

**UNICAMP**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

**PÓS GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**ÁREA DE METALOGÊNESE**

**Regina Maura de Miranda**

*Avaliação da atenuação de vegetação da Mata Atlântica à radiação gama natural emitida pela superfície*

**Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências,  
como parte dos requisitos para obtenção do título de  
Mestre em Geociências**

**Orientadora: Profa. Dra. Elisabete Maria Pascholati**

Este exemplar corresponde à  
redação final da tese defendida  
por Regina Maura de Miranda  
e aprovada pela Comissão Julgadora  
em 18/06/97.

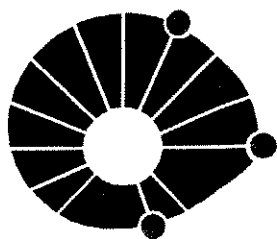
\_\_\_\_\_  
ORIENTADOR

**CAMPINAS - SÃO PAULO**

**JUNHO - 1997**

**M672a**

**31804/BC**



**UNICAMP**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

**PÓS GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**ÁREA DE METALOGÊNESE**

**Regina Maura de Miranda**

*Avaliação da atenuação de vegetação da Mata Atlântica à radiação gama natural emitida pela superfície*

**Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências,  
como requisito parcial para obtenção do título de  
Mestre em Geociências.**

Orientadora: **Profa. Dra. Elisabete Maria Pascholati - IG/UNICAMP** ✂  
Co-orientador: **Prof. Dr. Gilberto Amaral - IG/UNICAMP** ✂

**CAMPINAS - SÃO PAULO**

**JUNHO - 1997**



9413947

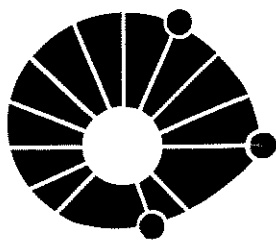
UNIDADE	73C
N.º CHAMADA:	
T/Unicamp	
m 672a	
V.º	
T.º	31804
P.º	281/97
L.º	0181
P.º	R\$ 11,00
DATA	17/10/97
N.º CPD	

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA I.G.- UNICAMP

~~P673a~~ Miranda, Regina Maura de  
Avaliação da atenuação de vegetação da Mata Atlântica à radiação gama natural emitida pela superfície / Regina Maura de Miranda.-  
Campinas. S.P.: [s.n.], 1997

Orientadora: Profa. Dra. Elisabete Maria Pascholati  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas,  
Instituto de Geociências.

I. Raios Gama. I. Pascholati, Elisabete Maria.  
II. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. III. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

PÓS GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

ÁREA DE METALOGÊNESE

**UNICAMP**

Autora: **Regina Maura de Miranda**

Título da dissertação: **Avaliação da atenuação da vegetação de Mata Atlântica à radiação gama natural emitida pela superfície**

Orientadora: **Profa. Dra. Elisabete Maria Pascholati - IG/UNICAMP**

Co-orientador: **Prof. Dr. Gilberto Amaral - IG/UNICAMP**

Aprovada em: \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

Presidente:

Examinadores:

Prof. Dra. Elisabete Maria Pascholati

Orientadora

Prof. Dr. Álvaro P. Crosta

Prof. Dr. Epaminondas S. B. Ferraz

Campinas,      de      de 1997

*Aos meus pais,  
que me deram a vida e um  
objetivo para vivê-la,*

**OFEREÇO**

*Aos meus irmãos  
e amigos,  
DEDICO*

## **Agradecimentos**

### **Agradeço**

- à Prof. Dra. Elisabete Maria Pascholati, pela orientação, amizade e estímulo constantes, durante a realização deste trabalho;
- aos Prof<sup>s</sup>. Drs. Epaminondas S. B. Ferraz do CENA/USP e Gilberto Amaral do IG/UNICAMP pela ajuda inestimável;
- ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela concessão de uma bolsa de estudos;
- à UNICAMP por ter me proporcionado a oportunidade de realizar este trabalho;
- ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura, CENA/USP, pelas facilidades oferecidas para a realização das medidas;
- ao Prof. Dr. Helder de Oliveira do CENA/USP, pela amizade e valiosa colaboração;
- aos responsáveis pelo Laboratório de Geoquímica do IG/UNICAMP, pela colaboração;
- aos geólogos Luis Camilo Pinto e Willian Campos da Mina Itajobi, pelo grande auxílio na etapa de campo;
- aos colegas do Curso de Pós-Graduação e demais funcionários do IG/UNICAMP, pelo convívio, amizade e compreensão a mim proporcionados.
- ao Prof. Dr. Jorge Yoshio Tamashiro do Instituto de Biologia da UNICAMP pelo auxílio na coleta das amostras de folhas.
- à CPRM (Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais) pelo apoio na etapa de campo.
- à aluna e colega Maria Irian M. Duarte pela execução do trabalho de correção de gamaespectrometria nas imagens da área.

## ÍNDICE

Lista de figuras.....	iv
Lista de tabelas.....	v
Lista de anexos.....	v
Resumo.....	vi
Abstract.....	vii
1. Introdução .....	1
2. Revisão bibliográfica .....	3
2.1. Princípios físicos.....	6
2.1.1. Interação da radiação com a matéria .....	6
a. efeito Compton.....	6
2.1.2. Estrutura da matéria e radioatividade .....	9
a. Radiação nuclear .....	9
b. Radioatividade da crosta terrestre .....	11
2.1.3. Atenuação de um feixe gama monoenergético .....	16
2.1.4. Instrumentos de medida .....	18
a. Gamaespectrômetros .....	18
b. Calibração de um gamaespectrômetro portátil .....	18
c. Instrumentos aéreos.....	20
d. <i>Background</i> .....	21
2.1.5. Modelo matemático .....	23
2.2. Geologia da área de trabalho.....	27
3. Materiais e métodos .....	32
3.1. Materiais.....	32
3.2. Métodos.....	38
4. Resultados e discussão .....	45
4.1. Laboratório .....	45
4.2. Campo .....	49
4.3. Integração dos dados de laboratório, campo e modelo matemático .....	55
5. Conclusões .....	58
6. Referências bibliográficas.....	60

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema do efeito Compton.....	7
Figura 2.2 Decaimento das séries radioativas naturais do $^{238}\text{U}$ , $^{235}\text{U}$ , $^{232}\text{Th}$ e decaimento do $^{40}\text{K}$ .....	10
Figura 2.3 Regiões de interação dominante dos raios gama com o efeito fotoelétrico, efeito Compton e Produção de Pares .....	11
Figura 2.4 Espectro de energias da radiação gama do decaimento das séries do $^{238}\text{U}$ , $^{232}\text{Th}$ e $^{40}\text{K}$ .....	13
Figura 2.5 Percentagem de interações por espalhamento Compton em materiais com diferentes números atômicos e energias .....	16
Figura 2.6 Feixe incidente no absorvedor de área A.....	17
Figura 2.7 Eficiência para cristais de NaI(Tl).....	22
Figura 2.8 Sistema de coordenadas esféricas para o detector aéreo .....	24
Figura 2.9 Limites de integração de $R$ e $\theta$ .....	25
Figura 2.10 Intensidade do volume do círculo.....	27
Figura 2.11 Região coberta pelo Projeto Rio das Velhas e localização da área de pesquisa (Mina Itajobi).....	29
Figura 3.1 Equipamento utilizado.....	32
Figura 3.2 Amostras do grupo 1 .....	34
Figura 3.3 Amostras do grupo 2 .....	35
Figura 3.4 Vista parcial da Mina Itajobi .....	40
Figura 3.5 Vegetação existente na área de campo .....	41
Figura 3.6 Tipo de vegetação na área de campo .....	42
Figura 4.1 Sequência de amostras x coeficiente de atenuação de massa.....	46
Figura 4.2 Densidade x coeficiente de atenuação de massa .....	46
Figura 4.3 Energia x coeficiente de atenuação de massa.....	49
Figura 4.4 Tório terrestre x tório aéreo .....	52
Figura 4.5 Urânio terrestre x urânio aéreo .....	52
Figura 4.6 Potássio terrestre x potássio aéreo .....	52
Figura 4.7 Círculo de investigação.....	53



Figura 4.8. Tório com vegetação x tório sem vegetação.....	56
Figura 4.9 Urânio com vegetação x urânio sem vegetação.....	56
Figura 4.10 Potássio com vegetação x potássio sem vegetação.....	57

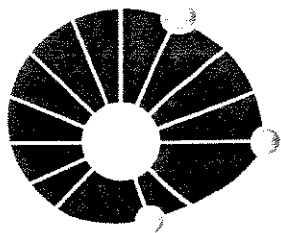
## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Conteúdo de K, U e Th em rochas magmáticas.....	14
Tabela 2.2 Conteúdo de K, U e Th em rochas sedimentares.....	14
Tabela 2.3 Conteúdo de K, U e Th em rochas metamórficas.....	15
Tabela 4.1 Amostras utilizadas e resultados obtidos .....	45
Tabela 4.2 Espécies de folhas utilizadas e resultados obtidos.....	48
Tabela 4.3 Dados de campo e dados aéreos.....	50

## LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 Mapas de isovalores

Anexo 2 Mapa de localização dos pontos de medida na área de trabalho



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

**PÓS GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**ÁREA DE METALOGÊNESE**

**UNICAMP**

**AVALIAÇÃO DA ATENUAÇÃO DE VEGETAÇÃO DA MATA ATLÂNTICA À  
RADIAÇÃO GAMA NATURAL EMITIDA PELA SUPERFÍCIE**

**RESUMO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Regina Maura de Miranda**

Muitos radionuclídeos naturais, emissores de radiação alfa, beta e gama, são conhecidos. A maioria ocorre em minerais formadores de rochas. Potássio, urânio e tório são os principais produtores naturais de radiação gama. Esta radiação pode ser medida em laboratório, no campo e em levantamentos aéreos. Neste último caso, além da atenuação atmosférica, a vegetação pode absorver quantidades substanciais de radiação emitida pelo solo, mas contribui também com radiação do potássio contido na sua estrutura.

Uma floresta é um meio anisotrópico de emissão e absorção, agindo como uma blindagem à radiação gama emitida pela superfície e também como fonte de radiação gama devida principalmente ao potássio acumulado nos troncos e folhas. Em outras palavras, há certos aspectos que estão associados às florestas e modificam o campo gama.

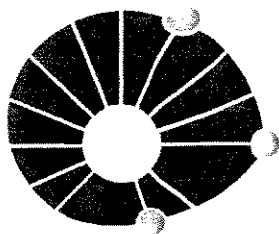
Neste trabalho procurou-se, por meio da gamaespectrometria aérea, de campo e de laboratório, avaliar o efeito de atenuação apresentado por uma vegetação do tipo Mata Atlântica à radiação gama natural emitida pela superfície.

Em medidas de laboratório foram encontrados valores para a atenuação dos troncos e folhas, sendo que estas absorvem menos radiação gama que aqueles.

Comparando-se dados terrestres e aéreos da região do Quadrilátero Ferrífero, próximo à cidade de Santa Bárbara (MG), verificou-se que as duas medidas tiveram valores equivalentes quanto aos níveis dos elementos Th, U e K, podendo-se fazer uma correlação entre esses dados e a geologia da região. Observou-se a influência da vegetação em alguns pontos, onde a atenuação pode chegar a altas porcentagens.

Medidas de laboratório, coeficientes de atenuação de massa, e de campo, foram aplicadas a um modelo matemático que simula a situação de uma medida aérea, chegando-se a uma porcentagem de atenuação para a cobertura vegetal.

Imagens LANDSAT-TM foram utilizadas para a obtenção de estimativas de biomassa, a partir dos quais foram elaborados modelos para correção dos efeitos de atenuação da radiação gama.



**UNICAMP**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

**PÓS GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**ÁREA DE METALOGÊNESE**

## **EVALUATION OF THE ATTENUATION OF ATLANTIC FOREST TO THE NATURAL GAMMA RADIATION EMITTED BY THE SURFACE**

### **ABSTRACT**

### **MASTER DISSERTATION**

**Regina Maura de Miranda**

Several natural alpha, beta and gamma radionuclides are known. Most of them occur in rock-forming minerals. Potassium, uranium and thorium are the main natural gamma radiation producers. This radiation can be measured in the laboratory, field or from aircrafts. In this case, besides atmospheric attenuation, vegetation can absorb substantial amounts of radiation emitted by soil, but can contribute with radiation from potassium contained in its structure.

A forest is an anisotropic medium of emission and absorption, that acts like a shield to the gamma radiation emitted by the surface and also as source of gamma radiation due to potassium accumulated in the trunks and leaves. This means that there are some aspects associated to forests that change the gamma field.

This work intends to evaluate, through aerial, terrestrial and laboratory gammaespectrometry, the effect of attenuation presented by vegetation to natural gamma radiation emitted from the surface.

Laboratory data indicated attenuation of trunks and leaves, the later absorbing less gamma radiation than the first.

Comparing terrestrial and airborne data from the Quadrilátero Ferrífero region, close to the town of Santa Bárbara, it was verified that both groups of data have equivalent values in the levels of the elements Th, U and K. It was observed that the vegetation in some points presented attenuation in high percentages.

Laboratory measurements, mass attenuation coefficients and field data, were applied to a mathematical model that simulate the situation of an airborne measurement, yielding a value for the attenuation of the vegetation cover.

LANDSAT-TM images were used to obtain biomass estimatives, and from these were elaborated correction models for the effects of the gamma radiation attenuation.

## 1. Introdução

A distribuição dos elementos radioativos na superfície terrestre é caracterizada pelas rochas que a compõem e pode ser modificada por vários processos geológicos, como intemperismo, erosão e transporte.

A componente terrestre da radiação gama natural mais utilizada em estudos geofísicos, provém do potássio, urânio, tório e produtos de seus decaimentos. O estudo da radiação gama natural fornece um espectro bastante amplo de aplicações, sendo que até o momento, este cobre apenas uma pequena fração da superfície terrestre, evidenciando um grande campo para novas pesquisas.

Os levantamentos gamaespectrométricos aéreos são utilizados, principalmente, para o mapeamento geológico mas também para exploração mineral; o produto pode ser útil também para monitoramento nuclear ambiental, determinação do equivalente água em neve, estimativas da umidade do solo e outros. Regiões de difícil acesso têm sido o fator determinante para empresas utilizarem a aerogamaespectrometria como meio de obtenção de informações sobre a superfície terrestre e pela facilidade na coleta de informações.

Os levantamentos terrestres são usados principalmente para a procura de recursos minerais (particularmente urânio e minerais a ele associados). Por outro lado, a gamaespectrometria terrestre, mais demorada, pode apresentar resultados quantitativos, enquanto a aérea só se obtinha qualitativos, até o presente. Ambos os tipos de levantamentos obtêm dados providos de até 1 metro de profundidade. Nos levantamentos aéreos deve-se evitar altitudes superiores a 150 metros devido à maior influência de raios cósmicos, decaimento radioativo e outros fatores que geram radiação de fundo.

No presente trabalho, utilizam-se dados de levantamento aéreo, terrestre e medidas de radiação gama em laboratório (os dois últimos realizados pela autora), com o objetivo de se estudar qual o efeito de atenuação de uma vegetação densa à radioatividade natural emitida pela superfície terrestre.

Dados radiométricos aéreos, ainda que devidamente corrigidos, são marcados pelo efeito de blindagem da umidade atmosférica e da vegetação, notadamente quando grandes volumes de biomassa estão presentes. O efeito da atenuação é função

da quantidade de biomassa (matéria orgânica) de uma floresta, da ordem de 5 - 10 g/cm<sup>2</sup>. Essa biomassa pode agir como um absorvedor de radiação gama proveniente da superfície e, contém ao mesmo tempo, isótopos emissores de radiação gama. Esse efeito é geralmente negligenciado durante a interpretação dos dados, sendo necessário, então, um método para a correção do mesmo, considerando, principalmente, a escassez de tais estudos tanto em regiões temperadas como em regiões tropicais úmidas.

Face ao exposto, o objetivo desta dissertação foi determinar qual a porcentagem de atenuação da radiação gama natural ocasionada pela vegetação tropical úmida (Mata Atlântica). Para tanto escolheu-se uma área que já tivesse dados aerogeofísicos, mais especificamente gama-espectrometria, na qual se pudesse realizar um levantamento terrestre e ainda efetuar medidas do coeficiente de atenuação de massa, em laboratório, de folhas e troncos de várias espécies de árvores.

Os dados aéreos utilizados são de gamaespectrometria e magnetometria do Projeto Rio das Velhas, realizado em 1991, com o objetivo de fomentar a pesquisa mineral na região do Quadrilátero Ferrífero, próximo à cidade de Santa Bárbara (MG).

A gamaespectrometria terrestre foi efetuada em pontos situados sob as linhas de voo desse projeto e as medidas de laboratório foram realizadas utilizando espécies da floresta coberta pelos levantamentos.

Os dados aerogamaespectrométricos foram convertidos de qualitativos (contagens por segundo-cps) para “semi-quantitativos” (partes por milhão-ppm e porcentagem), permitindo a utilização de razões entre os três elementos, potássio, urânio e tório.

Comparando-se então dados aéreos e terrestres, sobre e sob a vegetação, procurou-se identificar o quanto esta pode blindar a radiação natural da superfície, utilizando-se valores do coeficiente de atenuação de massa obtidos em laboratório.

## 2. Revisão bibliográfica

Os elementos U,  $^{40}\text{K}$  e Th em rochas e solos são fontes de radiação gama ambiental. O monitoramento desta radioatividade pode ser feito com vários tipos de detectores, sendo os mais conhecidos, os de Ge(Li) e NaI(Tl) (Lovborg et al. 1979).

Espectrômetros de raios gama têm a habilidade de discriminação de energia que permite a distinção entre elementos radioativos. Pode-se medir os raios gama em uma janela pré-determinada, contagem total, ou discriminar apenas as linhas do potássio, urânio e tório, com energias de 1,46 MeV ( $^{40}\text{K}$ ), 1,76 MeV ( $^{214}\text{Bi}$ ) e 2,62 MeV ( $^{208}\text{Tl}$ ), respectivamente.

Duval et al. (1971), estimaram o volume de material medido por um gamaespectrômetro aéreo. Mostrou-se que a altitude é o parâmetro mais importante na determinação do volume de material que produz uma certa porcentagem do sinal total observado. Observa-se, portanto, a importância de uma correta medida da altura. Já em Grasty et al. (1979), em linhas de vôo, a largura da faixa produzindo uma porcentagem fixa da radiação total detectada é significativamente menor que o diâmetro de um círculo produzindo a mesma radiação captada por um detector estacionário. Nielson et al. (1990) mostraram que o detector gama aéreo recebe radiação do solo num ângulo total de  $180^\circ$  e pode-se estabelecer que 66 % das contagens vêm de uma área de diâmetro aproximadamente igual a duas vezes a altura. A topografia tem influência, um vale ou colina pode produzir uma razão de contagem alta ou baixa, dependendo da inclinação. Bailey (1986) fez uma análise das formas espectrais de elementos radioativos naturais e suas variações com a altitude, utilizando uma modelagem simples tirada de Dickson et al. (1981).

Grasty (1979) mostrou que para o processamento de dados aéreos, quatro estágios são necessários: remoção do *background* (radiação de fundo), correção do *stripping* espectral (correção devida à ocorrência do efeito Compton), correção para a altitude e conversão dos dados em teores. Numa medida aérea há vários parâmetros que podem afetar a variação da razão de contagem dos raios gama com a altitude, segundo Grasty (1975): tempo morto do espectrômetro, espalhamento Compton, estrutura da aeronave e do próprio detector, resposta angular do cristal e variação da radioatividade com a profundidade do solo. Na análise feita para o tório (energia de

2,62 MeV), estes efeitos somados, reduzem em 6% sua absorção. As correções para estes efeitos devem ser feitas no pré-processamento dos dados

Lovborg et al. (1977), calcularam as sensibilidades, parâmetros para a correção da altitude e razões de *stripping* para quatro diferentes detectores de NaI(Tl).

Foi elaborado um modelo para a simulação de vôos sobre fontes radioativas circulares e lineares (Clark et al., 1972). Para as duas geometrias, a intensidade captada por um detector diminui com a altitude, mas para uma mesma altitude, a intensidade é maior para fontes lineares devido ao seu comprimento. Os picos observados para as fontes lineares são maiores, as duas têm um comportamento semelhante frente a mudanças de altitude. Enquanto que para fontes circulares, este comportamento é diferente, as de raio menor perdendo relativamente mais rendimento com o aumento da altitude.

O efeito de blindagem de uma floresta à radiação gama vem sendo alvo de estudo há bastante tempo. Kogan et al. (1971) já propunham uma variação que chegava a 40%, enquanto Schwarzer et al. (1972), afirmavam que a vegetação em particular não afetava em nada as medidas aerogamaespectrométricas.

Existem poucos estudos sobre o assunto em floresta tropical úmida. Podemos citar, em nosso país, os trabalhos de Figueiredo & Travassos (1992) e Travassos & Pires (1994), utilizando modelagens matemáticas, além de Pereira & Nordemann (1982), de caráter experimental.

Ferreira (1991) fez uma comparação entre dados de gamaespectrometria aérea e terrestre da Suíte Intrusiva de Itu, obtendo níveis de correlação não muito altos.

Figueiredo & Travassos (1992) determinaram o efeito de blindagem de uma floresta utilizando fontes de radiação gama e dois métodos de análise: aproximação ótica e Monte Carlo. Os autores, utilizando uma estrutura em camadas para a fitomassa aérea, demonstraram que esse modelo pode causar discrepâncias na estimativa do efeito de blindagem, que chegam a 20%, sendo este efeito dependente da altura, distribuição das fontes e energia dos fótons. Demonstraram, igualmente, que o coeficiente de correção do efeito de blindagem praticamente independe da altura, mas sim da distância à fonte ou à interface mais próxima, expressa em unidades de altura.

Travassos & Pires (1994), utilizando o mesmo modelo exposto no parágrafo anterior, chegaram à conclusão de que a atenuação pode chegar a 20 %. Utilizando o Método de Monte Carlo para estimar o efeito da anisotropia da biomassa, há discrepâncias de até 10 % para fontes de raios maiores que 0,5h.

Pereira & Nordemann (1983), realizaram estudos teóricos e experimentais sobre a blindagem de raios gama por floresta tropical úmida. Demonstraram que, para alturas típicas de vôo de 100 metros, uma cobertura florestal de 35 metros pode atenuar de 40% a 60% a radiação gama original, dependendo da energia considerada. Este trabalho foi o único experimental realizado até o presente momento. Esses autores utilizaram um eucaliptal, onde há homogeneidade e espaçamento regular das árvores, contrariamente à espécimens naturais do tipo de floresta, que não apresentam homogeneidade ou espaçamento regular. Os eucaliptos eram bastante jovens, com idades que não ultrapassavam quatro anos, o que não lhes dava altura e estrutura consideráveis para comparação com uma floresta tropical úmida.

Dickson et al. (1981), realizaram um experimento a fim de avaliar a absorção da radiação pelo ar até 112 metros de altura. A simulação foi conseguida utilizando-se folhas de madeira compensada entre a fonte (*pads* usados para a calibração) e o detector. Nove componentes espectrais foram observadas para cada radioelemento, sendo que a mais intensa (primária) fica a 30 metros da superfície e a mais fraca, a 112 metros de altitude. Considerou-se somente a contribuição das componentes primária e secundária.

Dados radiométricos, ainda que corrigidos, são marcados pela atenuação devido à umidade e vegetação (Lavreau & Alonso, 1991), como já salientado. Assim, algumas anomalias podem ser negligenciadas deixando de lado áreas de interesse. As imagens de sensoriamento remoto permitem fazer estimativas de biomassa, que conduzem ao estabelecimento de fatores de correção para a atenuação da radioatividade gama.

Nas medidas de espectrometria gama terrestre é aconselhável distinguir entre dois regimes de umidade: variações sazonais e variações devidas à chuvas pesadas (Kogan et al., 1971). A variação da umidade pode acarretar um aumento ou diminuição na atividade radioativa natural de rochas e solos. Uma precipitação atmosférica, cuja intensidade exceda  $0,1 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min.}$ , pode causar uma considerável



mudança no campo gama. A chuva não causa somente uma redução no fluxo dos raios gama, mas também uma distorção na sua distribuição de energia. Novamente, o fator espécie é importante, pois uma floresta tropical úmida típica apresenta 100% de umidade, o que não acontece em uma floresta de eucaliptos.

Procedimento semelhante ao desta dissertação foi utilizado por Carrol (1981), para medir a umidade do solo, através da radiação gama natural obtida por medidas aéreas e terrestres. Comparando os dois levantamentos, concluiu-se que as aéreas são 1,5 % mais baixas.

## **2.1. Princípios físicos**

### **2.1.1. Interação da radiação com a matéria (Evans, 1967)**

A interação de fótons com a matéria depende da energia do quantum. Ao contrário de partículas carregadas, um feixe bem colimado de raios gama mostra uma absorção exponencial na matéria devido aos fótons serem absorvidos ou espalhados num simples evento. Existem 3 processos principais de interação: efeito Compton (energias de 0,1 a 1,02 MeV), efeito fotoelétrico (abaixo de 0,1 MeV) e produção de pares (acima de 1,02 MeV). Como no trabalho a única interação estudada refere-se ao espalhamento Compton, apenas a este será dada ênfase.

#### **a. Efeito Compton**

Quando o fóton incidente tem uma energia  $h\nu_0$  ( $h$  é a constante de Planck e  $\nu_0$  a frequência) que não pode ser negligenciada em comparação a  $m_0c^2$  (energia dos elétrons livres, onde  $m_0$  é a energia de repouso do elétron e  $c$  a velocidade da luz), ocorre o efeito Compton. O momento de incidência deve ser conservado entre o fóton espalhado e o colidido. Exceto para o caso de ângulo de espalhamento nulo, a direção do fóton espalhado não é paralela à direção do fóton incidente. O fóton espalhado deve ter um momento menor que o incidente, e consequentemente uma menor energia característica. O momento remanescente e a energia são passados ao elétron colidido.

Na Figura 2.1 representa-se o fóton incidente, o fóton espalhado, emitido em um ângulo  $\theta$  com energia  $h\nu'$ , e o elétron de recuo em um ângulo  $\phi$ , momento  $p$  e

energia cinética  $T$ . Os caminhos dos fótons incidente e espalhado definem o plano de espalhamento. O momento normal a este plano é zero; o caminho do elétron de recuo deve estar no mesmo plano. Portanto, os três caminhos devem ser coplanares.

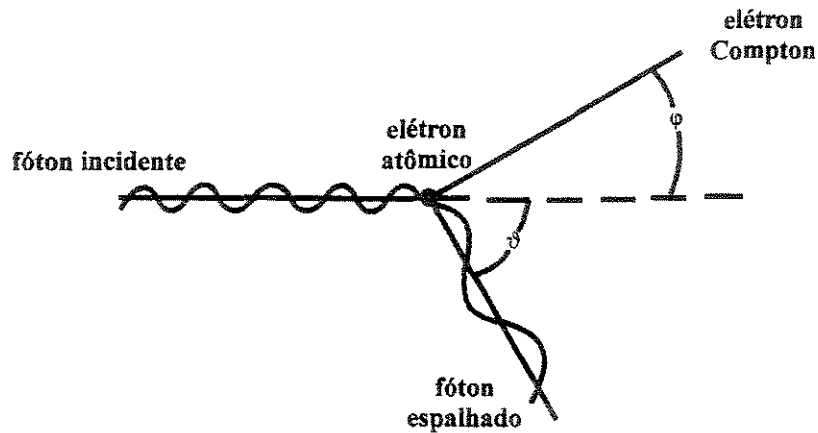


Figura 2.1 Esquema do efeito Compton (Evans, 1967)

### Coefficientes de atenuação total:

**Linear:** a probabilidade de que um fóton atravesse uma certa quantidade de matéria sem nenhum tipo de interação é o produto das probabilidades de sobrevivência para cada tipo particular de interação. A probabilidade de atravessar uma largura  $x$  do absorvedor sem uma colisão Compton é  $e^{-\alpha x}$ , onde  $\sigma = \sigma_a + \sigma_s$  é o coeficiente de atenuação linear total para o efeito Compton ( $a$  para absorção e  $s$  para espalhamento). Similarmente, a probabilidade de não haver interação fotoelétrica é  $e^{-\tau x}$ , onde  $\tau$  é o coeficiente de atenuação linear e, para não ocorrer produção de pares, é  $e^{-kx}$ , onde  $k$  é o coeficiente de atenuação linear. Então, um feixe colimado de raios gama de intensidade inicial  $I_0$ , depois de atravessar uma largura  $x$  do absorvedor, terá uma intensidade residual  $I$  de fótons primários não afetados:

$$\begin{aligned}
 I &= I_0 e^{-\alpha x} e^{-\tau x} e^{-kx} \\
 &= I_0 e^{-(\sigma + \tau + k)x} \\
 &= I_0 e^{-\mu_0 x}
 \end{aligned} \tag{1}$$

onde a quantidade  $\mu_0 = \sigma_a + \sigma_s + \tau + k$  é o coeficiente de atenuação linear total. Este coeficiente é uma medida do número de fótons primários que sofreram interações.

**Massa:** para qualquer tipo de interação, o coeficiente de atenuação de massa é o coeficiente linear dividido pela densidade  $\rho$  [g/cm<sup>3</sup>]. Todos os coeficientes de atenuação de massa são independentes da densidade e do estado físico (sólido, líquido e gasoso) do absorvedor. Isto porque as interações fundamentais são expressas como seção de choque por átomo e, quando estes são multiplicados pelo número de átomos por grama, obtém-se o coeficiente de absorção de massa.

### Coeficientes de atenuação Compton

Os coeficientes de atenuação Compton podem ser linear e de massa.

**Coeficiente de atenuação linear:** em um meio de absorção fino, tendo  $N$  átomos/cm<sup>3</sup>, cada átomo com  $Z$  elétrons e, uma largura  $dx$ , há  $(NZ)$  elétrons/cm<sup>3</sup> e  $(NZdx)$  elétrons/cm<sup>2</sup>. Um feixe colimado de  $n$  fótons/segundo, cada um com energia  $h\nu_0$ , passa normalmente através do meio. O número  $dn$  de fótons primários que são removidos do feixe colimado, por segundo, pelo meio, é dado por:

$$-\frac{dn}{n} = (NZdx)_e \sigma \quad (2)$$

onde  $_e \sigma$  é a seção de choque média de colisão.

A seção de choque do elétron é tomada como independente de  $Z$ , pois assume-se que no início  $h\nu_0$  era muito maior que a energia de ligação dos elétrons. Então  $_e \sigma$  é uma função somente da energia do fóton incidente e decresce monotonicamente à medida que  $h\nu_0$  aumenta.

No cálculo da transmissão fracional de fótons através de absorvedores reais, é conveniente usar coeficientes de atenuação lineares. Define-se o coeficiente de atenuação Compton total linear ( $\sigma$ ) como:

$$\sigma = NZ _e \sigma \text{ [cm}^{-1}\text{]} \quad (3)$$

Da equação (2) tem-se  $dn / n = -\sigma dx$ . Então, a transmissão fracional  $n / n_0$  de fótons primários não modificados, através de um absorvedor de largura  $x$  é:

$$\frac{n}{n_0} = e^{-\sigma x} \quad (4)$$

Isto, se as únicas interações significantes são as de Compton.

**Coefficiente de atenuação de massa:** ao invés do coeficiente de atenuação linear, é geralmente mais conveniente usar o coeficiente de atenuação de massa  $(\sigma / \rho) \text{ cm}^2/\text{g}$ .

A largura do absorvedor agora deve ser medida em unidades de  $(\rho x) \text{ g/cm}^2$ , e:

$$\frac{n}{n_0} = \exp - \left( \frac{\sigma}{\rho} \right) (\rho x) \quad (5)$$

A grande vantagem em se usar unidades de  $\text{g/cm}^2$  para medir a largura dos absorvedores é que iguais quantidades de vários absorvedores medidos nesta unidade dão a mesma atenuação Compton. O coeficiente de atenuação de massa  $(\sigma / \rho)$  é independente da natureza do absorvedor devido à constante de aproximação  $Z/A$  para todos os elementos.

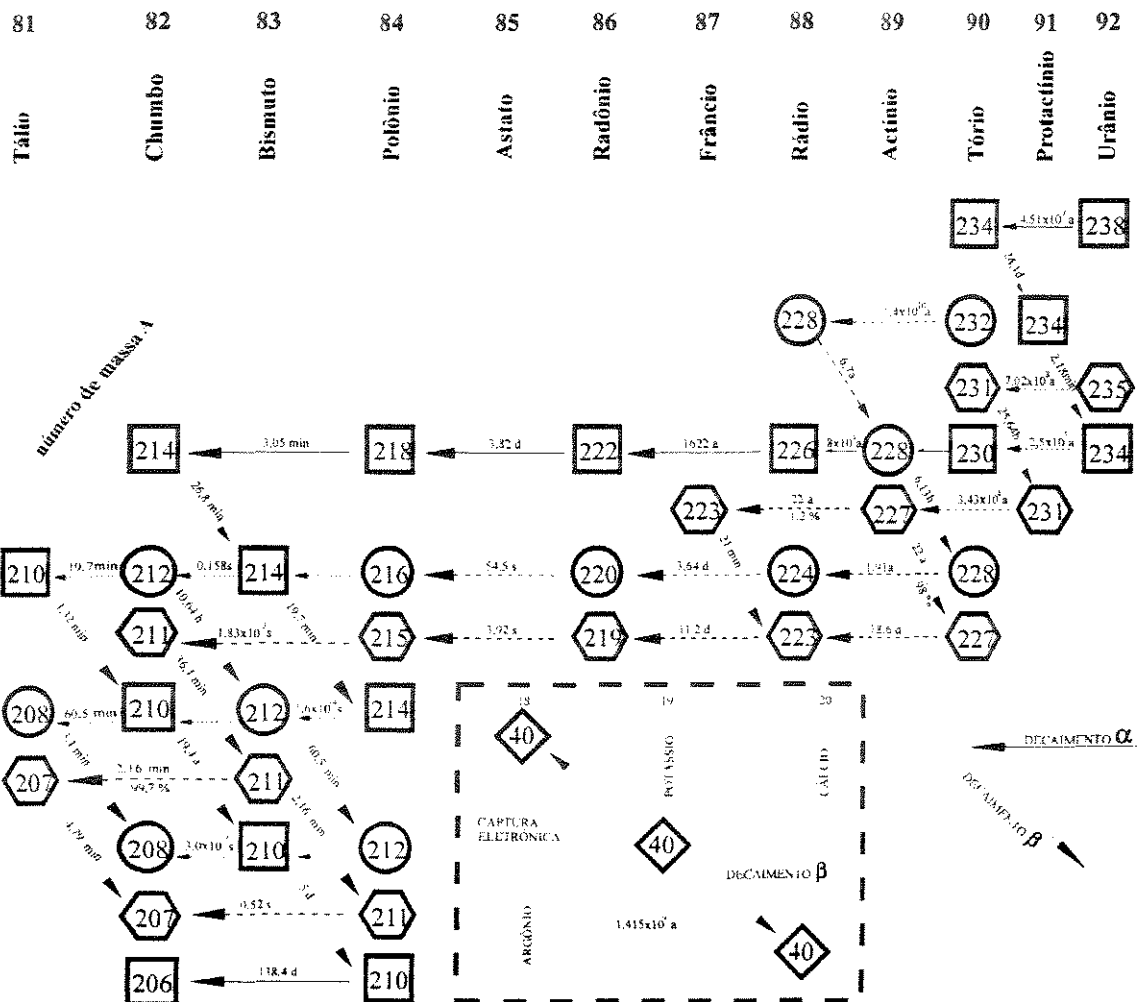
### 2.1.2. Estrutura da matéria e radioatividade

O núcleo atômico de alguns elementos desintegra-se e este processo é acompanhado pela emissão espontânea de partículas e/ou energia. Os elementos que possuem esta propriedade são denominados de radioativos. As transformações nucleares são caracterizadas pelo decaimento alfa, decaimento beta e captura de elétrons. O decaimento dos radionuclídeos ocorre em cadeia até que o estado fundamental seja alcançado, representado pelos produtos estáveis do decaimento (Figura 2.2).

#### a. Radiação nuclear

As transformações de radionuclídeos são acompanhadas da emissão de partículas carregadas ou neutrons. Os núcleos atômicos gerados estão geralmente num estado excitado. A transição para um estado energeticamente estável ocorre pela emissão de energia característica. O fluxo de partículas carregadas, neutrons ou energia característica, é a radiação.

A radiação **alfa** consiste de um fluxo de partículas positivamente carregado, formado por 2 prótons e 2 neutrons. O poder de penetração dessas partículas na matéria é baixo (da ordem de  $10^{-2} \text{ m}$  e  $10^{-5} \text{ m}$  em substâncias sólidas).



**Figura 2.2** Decaimento das séries radioativas naturais do  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e decaimento do  $^{40}\text{K}$ . O decaimento dos isótopos mostrados por linhas cheias são usados em gama-espectrometria de campo e laboratório (Mares, 1984)

A radiação **beta** consiste de um fluxo de elétrons.

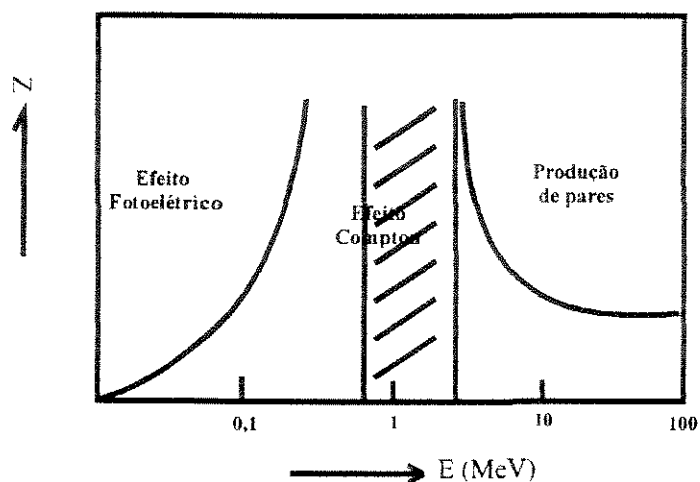
A radiação **gama** é a radiação eletromagnética que, atravessando a matéria, tem natureza onda-partícula. A velocidade de propagação corresponde à da luz ( $c$ ). Sua energia  $E$ , frequência  $\nu$  e comprimento de onda  $\lambda$  são dados pela relação:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (6)$$

onde  $h$  é a constante de Planck ( $6,6256 \times 10^{-34}$  J.s).

Na Figura 2.3 observa-se a dependência da energia para o número atômico nos três processos de interação; na área hachurada encontram-se as energias

representativas dos elementos radioativos naturais de interesse ao estudo da radioatividade da crosta.



**Figura 2.3** Regiões de interação dominante dos raios gama com o efeito fotoelétrico, efeito Compton e produção de pares  
( $Z$  - número atômico) (Mares, 1984)

#### **b. Radioatividade da crosta terrestre**

A atividade gama natural das rochas e solos é produzida pela presença de potássio, urânio e tório. A radiação gama dos radionuclídeos é caracterizada pela energia e intensidade, que é uma função da concentração do nuclídeo.

O conteúdo de K em rochas pode estar em um intervalo de 0 a 10 %, a média é aproximadamente 2 %. O conteúdo de U e Th em rochas varia de zero a dezenas de ppm. A quantidade de K, U e Th depende do tipo da rocha e ambiente geológico (IAEA-TEC DOC.566).

A concentração de elementos radioativos no solo é determinada pela radioatividade da rocha fonte e da totalidade de processos de formação de solos. Uma regra geral para solos, é a correlação entre a concentração de elementos radioativos e a constituição mecânica. A radioatividade é mais alta quanto maior a fração de argila (partículas menores que 0,002 mm).

Em grande parte da superfície terrestre, o substrato rochoso é coberto pelo solo. Assim, a radiação que dele emana é o contribuinte mais importante na radiação

terrestre. Algumas vezes os minerais radioativos estão concentrados e outras, espalhados homogeneamente no solo.

A concentração média de K na vegetação é de 0,05 %, mas em gramíneas pode ser 10 vezes mais alta que em árvores (IAEA-TEC DOC.566).

O espectro de energia primária das radiações gama do K, U e Th é diferente (Figura 2.4). Na série do  $^{238}\text{U}$  a parte predominante, 82 % dos gamas característicos são emitidos pelo  $^{226}\text{Ra}$  e seus produtos de decaimento; na série do  $^{232}\text{Th}$  85 % é devido ao  $^{208}\text{Tl}$ .

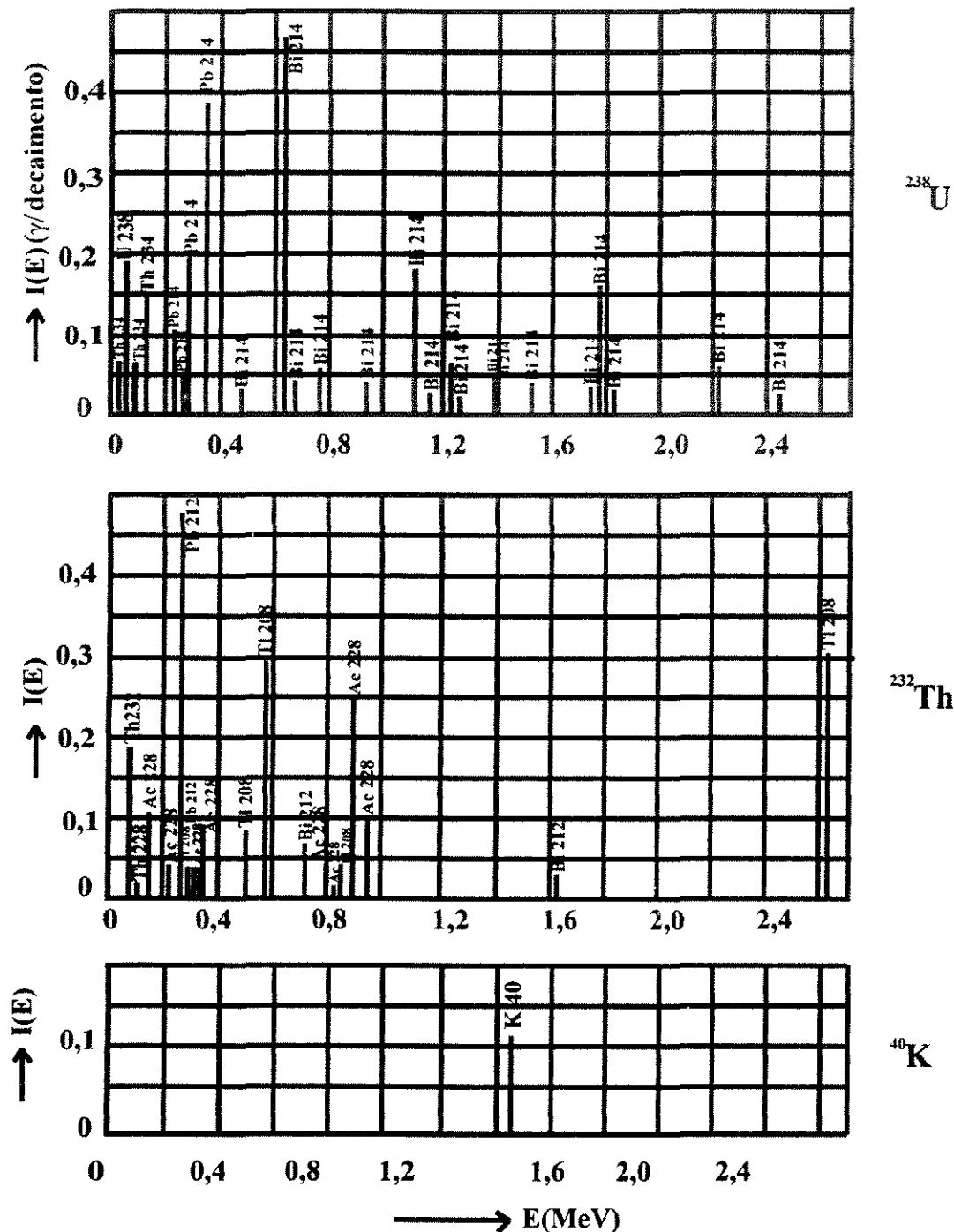
A radiação primária, passando através da matéria, gera radiação espalhada e secundária. Todos os componentes contribuem para um espectro contínuo de energia, que pode ser detectado devido às suas feições características (Mares, S. 1984). O espectro composto de energia dos raios gama dos elementos radioativos naturais pode ser dividido em duas regiões: uma de 0 a 0,4 MeV e outra de 0,4 a 2,6 MeV. Na região de altas energias ( $E > 0,4 \text{ MeV}$ ), o valor da intensidade da radiação gama é pouco controlado pela composição da rocha, a contribuição da radiação espalhada é menor e os picos de radiação dos radionuclídeos primários são evidentes no espectro contínuo de energia.

**Urânio:** está presente na crosta em concentrações de 2 a 4 ppm em média. Forma minerais isolados, ou ainda existe em formas dispersas. Em rochas, está presente em altas concentrações em minerais acessórios (zircão, esfeno, apatita, xenotima, monazita e ortita). A abundância natural dos isótopos do U compreende 99,274 % de  $^{238}\text{U}$ , 0,720 % de  $^{235}\text{U}$  e 0,006 % de  $^{234}\text{U}$ . As meias-vidas do  $^{238}\text{U}$  ( $4,507 \times 10^9$  anos) e  $^{235}\text{U}$  ( $7,02 \times 10^8$  anos) são altas; ambos os elementos-pais geram equilíbrio radioativo na série, ao longo do tempo. O urânio é considerado um elemento móvel sob diferentes condições de pressão e temperatura. Como resultado, o equilíbrio radioativo entre  $^{238}\text{U}$  e  $^{226}\text{Ra}$  é frequentemente perturbado sob condições naturais.

**Tório:** gera compostos oxidados de formas similares aos do urânio. Sua concentração média na crosta é de 8 a 12 ppm. Em rochas, o tório está presente em grande quantidade em minerais acessórios. Sua meia-vida é de  $1,4 \times 10^{10}$  anos. O transporte mecânico é a principal forma de movimento.

**Potássio:** está presente na crosta numa concentração média de 2,5 %. É um elemento muito abundante; em rochas magmáticas e metamórficas, sendo que o feldspato

potássico, leucita, nefelina, biotita, muscovita, sericita e flogopita têm os mais altos índices de potássio. A meia-vida do  $^{40}\text{K}$  é de  $1,415 \times 10^9$  anos. É móvel sob diferentes condições de pressão e temperatura.



**Figura 2.4** Espectro de energias da radiação gama do decaimento das séries do  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  (Mares, 1984)



A radioatividade das rochas magmáticas tende a aumentar com o teor em sílica. O conteúdo de elementos radioativos em minerais acessórios é controlado pelas condições de sua origem. As rochas magmáticas efusivas são geralmente mais ativas que suas equivalentes profundas. Rochas ígneas de fases terminais de ciclos magmáticos são distinguíveis pela alta radioatividade. Em sienitos, fonolitos, granitos e granodioritos, a radioatividade é alta. Entretanto rochas básicas e ultrabásicas são caracterizadas por baixa atividade. Tabela 2.1.

Nas rochas sedimentares a radioatividade está relacionada ao mineral depositado. Quando as rochas se desintegram, o urânio é transportado juntamente com os fragmentos ou dissolve-se na água da superfície, ou subterrânea, migrando na forma de compostos carbonáticos para a bacia sedimentar (neste caso os depósitos de água profunda tornam-se ricos em urânio). Tabela 2.2.

Os compostos de tório são praticamente insolúveis, formando minerais acessórios (monazita, apatita, etc.) ou sendo transportados por correntes de água com fragmentos das rochas, com subsequente sedimentação gravitacional.

**TABELA 2.1** Conteúdo de K, U e Th em rochas magmáticas (Mares, 1984)

<b>Rochas</b>	<b>% SiO<sub>2</sub></b>	<b>% K</b>	<b>ppm U</b>	<b>ppm Th</b>	<b>Th/U</b>
<b>ácidas</b>	60 a 75	3,34	3,5	18,0	5,1
<b>intermediárias</b>	52 a 60	2,31	1,8	7,0	4,0
<b>básicas</b>	40 a 52	0,83	0,5	3,0	6,0
<b>ultrabásicas</b>	< 40	0,03	0,003	0,005	1,7

**TABELA 2.2** Conteúdo de K, U e Th em rochas sedimentares (Mares, 1984)

<b>rochas</b>	<b>% K</b>	<b>ppm U</b>	<b>ppm Th</b>	<b>Th/U</b>
<b>folhelhos</b>	2,7	4,0	11,0	2,8
<b>e areias</b>				
<b>argilas</b>	1,2	3,0	10,0	3,3
<b>calcário</b>	0,3	1,4	1,8	1,3

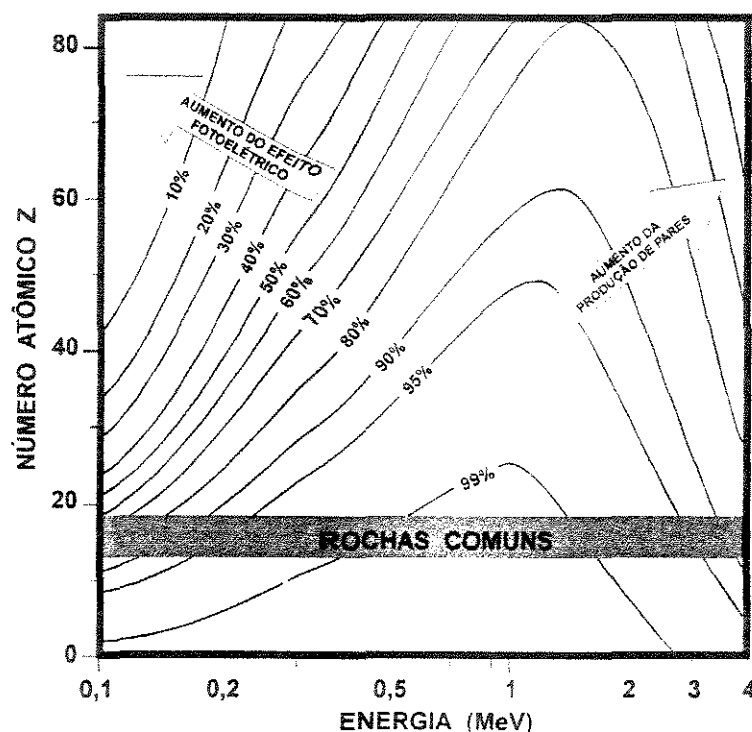
A radioatividade das rochas metamórficas corresponde predominantemente às propriedades do material primário. Somente em alguns momentos em que ocorre metamorfismo a radioatividade pode ser realçada ou reduzida, dependendo da natureza do protolito. Alguns ortognaisses e migmatitos de injeção mostram alta radioatividade, mas anfibolitos e serpentinitos são distinguíveis por sua baixa radioatividade; este baixo nível em alguns tipos de granito é resultado de baixos conteúdos de U e Th. Tabela 2.3.

**TABELA 2.3** Conteúdo de K, U e Th em rochas metamórficas (Mares, 1984)

rochas	% K	ppm U	ppm Th	Th/U
gnaisses	2,0	1,6	8,0	5,0
anfibolitos	0,7	1,0	4,0	4,0
mármore	0,4	1,1	1,8	1,6

No campo, a investigação da radioatividade das rochas é geralmente feita medindo-se radiação gama. A atividade total dos raios gama é a soma das atividades do K, U e Th.

Pela Figura 2.5 observa-se que 95 % das interações dos raios gama com as rochas são por espalhamento Compton (Fitch, A. A. 1982). Se o conteúdo de U na rocha causa um significativo aumento no  $Z_{eq}$  (número de átomos do elemento tendo a mesma razão de atenuação Compton para fotoelétrica, numa dada energia do fóton) da mesma, em baixas energias a porcentagem de interações por efeito Compton decresce e aumenta a porcentagem do efeito fotoelétrico. A absorção total pelo efeito fotoelétrico faz com que a contagem de raios gama diminua, resultando numa relação não linear entre o verdadeiro conteúdo do elemento e o captado por um detector. Este efeito, chamado “efeito Z”, torna-se importante fonte de erro (acima de 0,4 %) no conteúdo de U nas rochas.



**Figura 2.5** Percentagem de interações por espalhamento Compton em materiais com diferentes números atômicos e energias. Indica-se o Z equivalente às rochas comuns (Fitch, A. A., 1982)

### 2.1.3. Atenuação de um feixe de radiação gama monoenergético:

Quando um feixe de radiação gama monoenergético incide na matéria, interage e é atenuado. Considere-se um feixe de radiação gama incidente num absorvedor de área  $A$  ( $\text{cm}^2$ ) e espessura  $x$  (cm), conforme Figura 2.6. A intensidade do feixe, que é o número médio de fótons que atravessa  $1 \text{ cm}^2/\text{s}$  do absorvedor, decresce com a espessura do absorvedor. Considerando-se uma lâmina de espessura  $dx$  no ponto  $x$ , se  $N$  é o número de átomos por unidade de volume, o número total de átomos na lâmina será  $Ndx$  (Pinto, 1978).

A probabilidade de um fóton ser removido do feixe por um átomo é igual à probabilidade de espalhamento quântico de um disco imaginário de área  ${}_a\delta$  ( $\text{cm}^2$ ), onde  ${}_a\delta$  é a seção total de choque por átomo, e esta probabilidade é igual a  ${}_a\delta/A$ . A probabilidade total de um fóton ser removido do feixe por qualquer dos átomos da lâmina é de  $({}_a\delta/A)Ndx = {}_a\delta Ndx$ . Se a intensidade média do feixe incidente em  $\text{cm}^2/\text{s}$

é  $I(x)$ , o número médio de fótons removidos por  $\text{cm}^2/\text{s}$  do feixe incidente pela lâmina é  $I(x) \, {}_a\delta N dx$ .

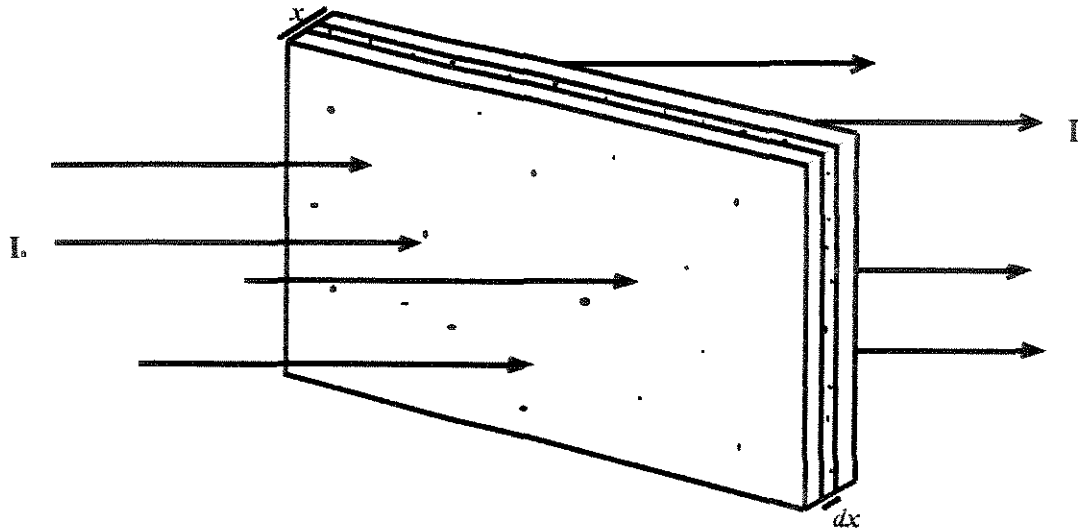


Figura 2.6 Feixe incidente no absorvedor de área A

O número de fótons por  $\text{cm}^2/\text{s}$  que emerge da lâmina será dado por:

$$I(x - dx) = I(x) \, {}_a\delta N dx \quad (7)$$

ou ainda:

$$dI(x) = I(x + dx) - I(x) = -I(x) \, {}_a\delta N dx \quad (8)$$

o valor de  $I(x)$  pode ser obtido integrando-se a expressão (8) em relação a  $x$ :

$$\frac{dI(x)}{I(x)} = -{}_a\delta N dx \quad (9)$$

$$\int_0^x \frac{dI(x)}{I(x)} = -{}_a\delta N \int_0^x dx \quad (10)$$

$$\ln I(x) - \ln I(0) = -{}_a\delta N x \quad (11)$$

$$\ln \frac{I(x)}{I(0)} = -{}_a\delta N x \quad (12)$$

$$I(x) = I(0) \exp(-{}_a\delta N x) \quad (13)$$

ou ainda:

$$I(x) = I(0) \exp(-\mu x) \quad (14)$$

onde  $\mu = \delta N$  é o coeficiente de atenuação linear ( $\text{cm}^{-1}$ ) do material considerado. Este coeficiente é igual ao inverso da espessura do absorvedor, necessária para atenuar o feixe por um fator “e”. Esta espessura é denominada comprimento de atenuação  $\lambda$  e é dado por:

$$\lambda = 1/\mu \quad (15)$$

Convém observar que a equação (14), denominada Lei de Beer-Lambert, pode ser escrita em função da densidade  $\rho$  do absorvedor:

$$I(x) = I(0) \exp\left(-\frac{\mu}{\rho} \cdot \rho x\right) \quad (16)$$

$$I(x) = I(0) \exp(-\bar{\mu} \bar{x}) \quad (17)$$

onde  $\bar{\mu}$  é o coeficiente de atenuação de massa ( $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ) do absorvedor para a energia considerada e  $\bar{x}$  é a densidade superficial ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ).

#### 2.1.4. Instrumentos de medida

##### a. Gamaespectrômetros

Existe um grande número de técnicas de investigação baseadas na espectroscopia da radiação gama natural ou induzida.

Detecores cintilométricos são geralmente empregados para medidas espectroscópicas de radiação gama. Oferecem muitas vantagens, incluindo alta eficiência intrínseca, tempo morto pequeno, resolução de energia razoável, fatores estes que dependem do equipamento, já que pode ser construído de diferentes tamanhos e formas. Os mais utilizados são os de NaI(Tl), mas outros tipos estão disponíveis (CsI(Tl), BGO, CsI(Na)) (Technical Reports Series no. 174, 1976).

Para se efetuar os levantamentos as janelas são ajustadas ao redor dos picos característicos do K, U e Th (1,46 MeV, 1,7 MeV e 1,76 MeV, respectivamente).

O volume dos cristais dos espectrômetros aéreos é bem maior que os dos portáteis, aumentando a sensibilidade.

##### b. Calibração de um espectrômetro portátil

Para a calibração deste tipo de espectrômetro são necessárias fontes radioativas artificiais de composição conhecida, as quais possam ser consideradas efetivamente infinitas em tamanho, para um detector na sua superfície.

Um mínimo de quatro fontes são necessárias, das quais uma contém urânio na forma de pitchblenda, outra tório na forma de torita e outra potássio na forma de feldspato potássico. Uma quarta fonte de calibração completamente livre de radiação funciona como *background* para remover os efeitos da radiação cósmica, produtos do decaimento do radônio no ar e radiação da superfície ao redor. As fontes de calibração devem estar no intervalo de concentração das amostras a serem analisadas. É recomendável que o urânio usado nas fontes esteja em equilíbrio com os produtos-filhos e seja um baixo emanador de radônio. Para se evitar que a radiação de uma fonte interfira na outra, seus centros devem estar pelo menos 15 metros afastados, sendo seus diâmetros de 2 metros (Technical Reports Series no. 174, 1976).

Para se calibrar um espectrômetro portátil, os três fatores de *stripping* devem estar estabelecidos, bem como as sensibilidades em termos de contagens por segundo por unidade de concentração.

Se  $C_{KK}$  é o aumento na contagem na janela do potássio sobre aquele do alvo e  $K_0$  é a concentração de potássio na fonte, então a sensibilidade  $S_K$  é:

$$S_K = \frac{C_{KK}}{K_0} \quad (18)$$

Similarmente:

$$S_U = \frac{C_{UU}}{U_{ppm}} \quad S_{Th} = \frac{C_{TTh}}{Th_{ppm}} \quad (19)$$

onde  $C_{UU}$  e  $C_{TTh}$  são os aumentos da razão de contagem nas janelas do urânio e tório nas fontes destes mesmos sobre os alvos.  $U_{ppm}$  e  $Th_{ppm}$  são as concentrações de U e Th das fontes.

Devido ao espalhamento na amostra e detector, e à baixa energia primária dos raios gama, algumas contagens  $C_{TU}$  e  $C_{TK}$  (aumentos da razão de contagem nas janelas do urânio e potássio devido ao tório) também aparecerão nos canais de U e K sobre a fonte de Th. A razão Th/U referida como  $\alpha$ , é definida como as contagens no canal do U para cada contagem no canal do Th, de uma fonte pura de Th, e é dada por:

$$\alpha = \frac{C_{TU}}{C_{TTh}} \quad (20)$$

A razão do Th,  $\beta$ , é:

$$\beta = \frac{C_{TK}}{C_{TTh}} \quad (21)$$

Similarmente, em uma fonte pura de U, algumas contagens,  $C_{UK}$  serão detectadas na janela do potássio. As contagens na janela do K para cada do U, serão dadas por:

$$\gamma = \frac{C_{UK}}{C_{UU}} \quad (22)$$

Para uma medida de campo, as concentrações médias de K, U e Th,  $K_{\%}$ ,  $U_{ppm}$  e  $Th_{ppm}$  num lugar em particular na superfície, são relativas às razões de contagem nas janelas do Th, U e K, e dadas por:

$$Th_{ppm} = \frac{1}{S_{Th}}(Th - Th_B) \quad (23)$$

$$U_{ppm} = \frac{1}{S_U}[U - U_B - \alpha(Th - Th_B)] \quad (24)$$

$$K_{\%} = \frac{1}{S_K}\{K - K_B - \beta(Th - Th_B) - \gamma[(U - U_B) - \alpha(Th - Th_B)]\} \quad (25)$$

onde  $Th_B$ ,  $U_B$  e  $K_B$  são o *background*, determinado em medidas na água.

### c. Instrumentos aéreos

Para um instrumento aéreo, são necessárias nove constantes de calibração. Como no caso dos instrumentos portáteis, seis são para estabelecer as sensibilidades e fatores de *stripping*. As três adicionais são necessárias para corrigir a atenuação atmosférica.

Exige-se extensas fontes (mínimo de 8 metros de diâmetro e 15 de profundidade) de calibração, já que é difícil posicionar os detectores estacionários no mesmo lugar sobre pequenas fontes.

O cálculo dos três fatores de *stripping* é feito da mesma maneira que para os instrumentos portáteis, usando as equações (23), (24) e (25).

Experimentalmente, a contagem total dos espectrômetros aéreos decresce exponencialmente com a altitude num intervalo de 70 a 250 metros. A relação entre a contagem total ( $N$ ) depois da correção para o *background*, com a altitude ( $h$ ) é dada por:

$$N = Ae^{-\mu h} \quad (26)$$

onde  $A$  é uma constante,  $\mu$  é o coeficiente de atenuação que tem valores típicos de aproximadamente  $6,6 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ .

Uma faixa-teste de calibração é necessária para se determinar os parâmetros  $A$  e  $\mu$  e a sensibilidade do equipamento na altitude do levantamento. A faixa deve ser plana, uniforme em radioatividade e ter um mínimo de 1 por 3 km. Devem ser feitos vários vôos, com altitudes cobrindo o intervalo usado no levantamento.

As razões de contagem ( $N_S$ ) numa altitude ( $H_S$ ) deve ser corrigida para a altitude do levantamento ( $H_0$ ) usando a relação:

$$N_o = N_S e^{-\mu(H_0 - H_S)} \quad (27)$$

onde  $N_o$  é a razão de contagem corrigida para a altitude do levantamento.

Devido à forte dependência da razão de contagem com a altitude, é essencial que todas elas sejam corrigidas para a altitude do levantamento utilizando a equação (27).

A Figura 2.7 ilustra a eficiência de cristais de NaI. Para energias entre 1,5 MeV e 100 keV (abaixo da predominância do efeito fotoelétrico). Quanto maior o cristal, 35 % mais eficiente, enquanto que os menores perdem uma grande fração de raios gama por espalhamento fora do cristal (Telford, W. M. 1990).

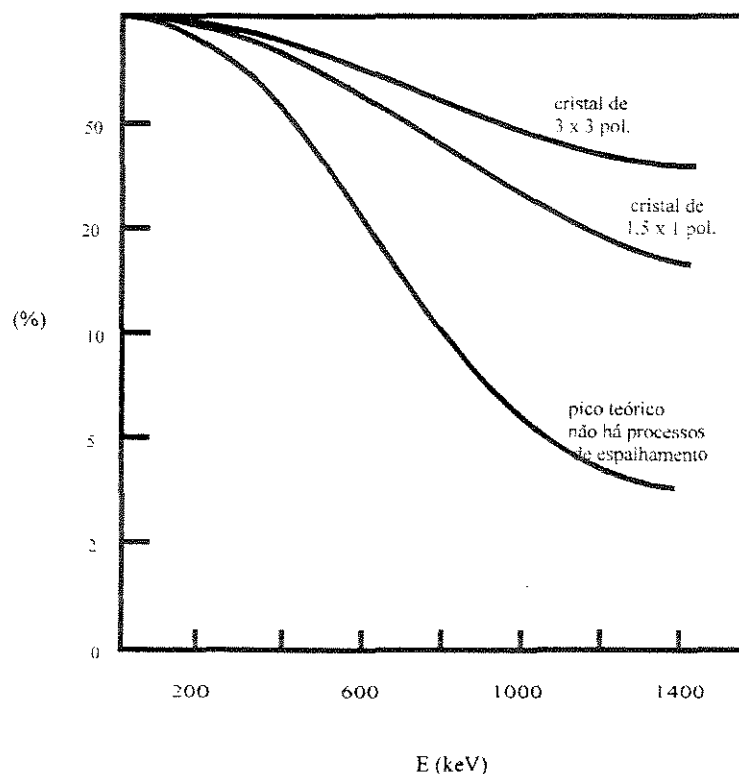
#### d. Background (Nielson et al., 1990)

O espectro discreto de linhas que dão informação sobre a abundância dos radionuclídeos pode ser influenciado por:

- contaminação do  $^{40}\text{K}$  no cristal do detector;
- contaminação do  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  e  $^{40}\text{K}$  em materiais usados na construção de tubos fotomultiplicadores e no tubo do cristal fotomultiplicador;
- acúmulo de radiação na estrutura das aeronaves (para sistemas aéreos);
- instrumentos luminescentes de rádio, como os de navegação em levantamentos aéreos e relógios nos terrestres;



- e. interação de raios cósmicos com núcleos presentes no ar, na aeronave, no detector;
- f. radioatividade atmosférica dos produtos do gás radônio da série do urânio.



**Figura 2.7** Eficiência para cristais de NaI(Tl) (Telford, W. M. 1990)

Raios cósmicos são partículas carregadas, de origem extraterrestre, que se movem em alta velocidade. Estes interagem com a atmosfera terrestre através de processos nucleares e eletromagnéticos, perdendo um pouco da sua identidade.

### Efeitos meteorológicos

**Bismuto 214 da atmosfera:**  $^{222}\text{Rn}$ , com uma vida média de 3,8 dias, emana da superfície numa razão que depende da pressão do ar, umidade do solo, cobertura do solo, vento e temperatura; decai para  $^{214}\text{Bi}$ , o indicador do urânio na espectrometria de raios gama. Uma inversão de temperatura na atmosfera ocorre quando a temperatura aumenta com a altitude. Nessas condições, o  $^{222}\text{Rn}$  acumula-se próximo da superfície e, como resultado, ocorrem anômalas indicações de urânio, as quais não têm relação com o conteúdo do elemento nas rochas e no solo abaixo do detector.

Remover este tipo de *background* é importante em mapeamentos geológicos e pode ser de fundamental importância para estudos ambientais.

Como águas calmas contêm concentrações negligenciáveis de nuclídeos radioativos, vôos sobre um grande corpo de água antes e depois de cada levantamento aéreo ajuda a reconhecer e conseqüentemente eliminar o *background* atmosférico. Para levantamentos terrestres, o *background* pode ser medido segurando o espectrômetro portátil sobre água com no mínimo 1 metro de profundidade, e com uma área maior do que o cone de detecção. Em laboratório, no caso deste estudo, o *background* é medido sem amostra.

**Queda de chuva:** os seguintes efeitos devidos à chuva podem ser observados:

- a. água parada aumenta a atenuação de uma maneira dependente da energia e causa a distorção do espectro observado na direção dos raios gama de alta energia;
- b. elementos radioativos e seus produtos podem ser removidos seletivamente de alguns locais por uma chuva rápida;
- c. alguns nuclídeos podem ser removidos de 0,2 a 0,45 metros, a zona de radiação, por causa da percolação para baixo devido à chuva;
- d. umidade extra no solo pode impedir que o radônio escape para a atmosfera, causando a redução da contribuição da superfície na janela do  $^{214}\text{Bi}$ ;
- d. a chuva pode carregar o  $^{214}\text{Bi}$  da atmosfera e então reduzir o *background* no canal selecionado para detectar o  $^{238}\text{U}$ .
- e. em algumas circunstâncias, o  $^{214}\text{Bi}$  é depositado na superfície, aumentando a radiação desta.

#### 2.1.5 Modelo matemático (Duval et al., 1971)

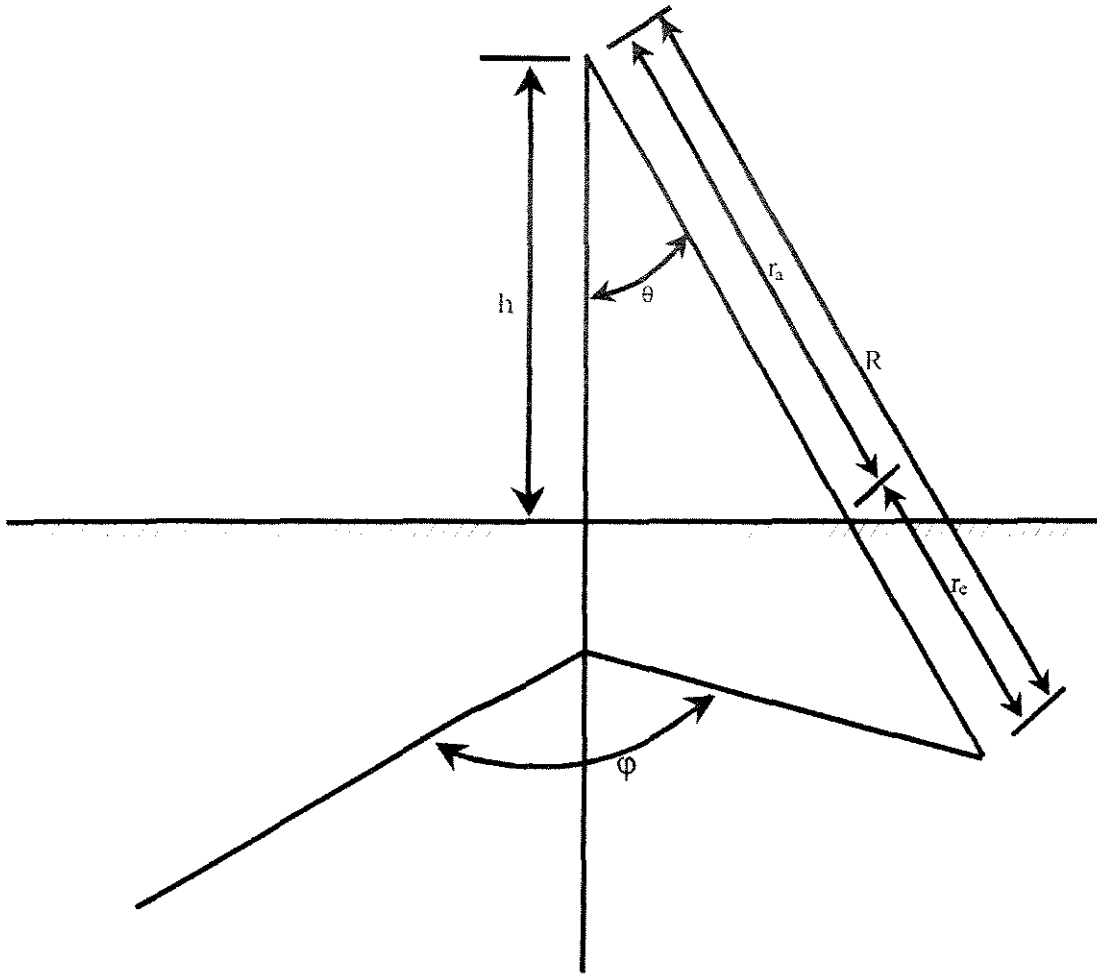
Pode-se também fazer um estudo da atenuação de uma floresta à radiação gama emitida pela superfície, teoricamente, utilizando um modelo matemático.

O volume de material medido por um espectrômetro de raios gama aéreo é, neste caso, uma área circular denominada círculo de investigação.

Na Figura 2.8, a intensidade no detector devido a um volume arbitrário é dada, em coordenadas polares, por:

$$dC = \frac{A \varepsilon \gamma}{4\pi R^2} \exp(-\mu r_a \rho_a) \exp(-\mu r_e \rho_e) R^2 \sin\theta d\theta d\varphi dR \quad (28)$$

onde  $\gamma$  é o número de raios gama emitidos por metro cúbico da fonte,  $A$  é a seção de área do detector,  $\varepsilon$  é a eficiência do detector para uma energia em particular,  $\mu$  é o coeficiente de atenuação para uma dada energia,  $\rho_a$  é a densidade do ar,  $\rho_e$  é a densidade do material fonte,  $r_a$  é a distância percorrida pelos raios gama através do ar e  $r_e$  é a distância percorrida através da fonte.



**Figura 2.8** Sistema de coordenadas esféricas para o detector aéreo  
(Duval, 1971)

Esta equação é uma aproximação para um cilindro reto com diâmetro igual à altura. As distâncias percorridas podem ser expressas por:

$$r_e = R - \frac{h}{\cos \theta} \quad r_a = \frac{h}{\cos \theta} \quad (29)$$

onde  $h$  é a altura do detector. Substituindo em (28) tem-se:

$$dC = \frac{A \varepsilon \gamma}{4\pi} \exp\left(\frac{-\mu_a \rho_a h}{\cos \theta}\right) \exp\left[-\mu \rho_e \left(R - \frac{h}{\cos \theta}\right)\right] \sin \theta d\theta d\varphi dR \quad (30)$$

Esta equação deve ser integrada sobre o volume da fonte. Os limites são:

$$R_1 \leq R \leq \infty$$

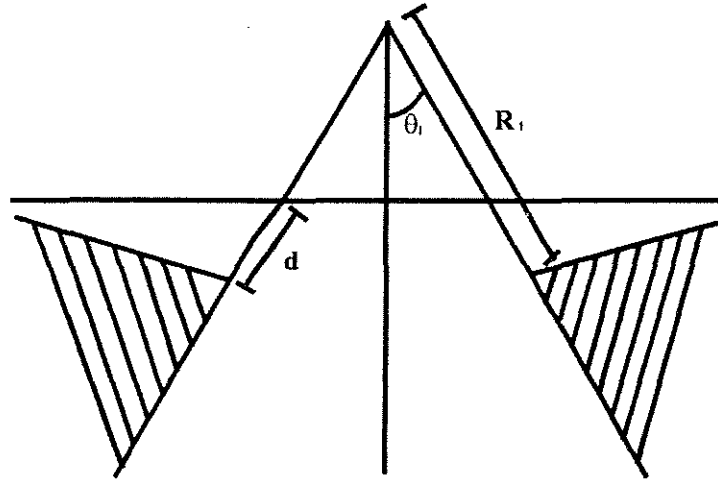
$$\theta_1 \leq \theta \leq \pi/2$$

$$0 \leq \varphi \leq 2\pi$$

Então:

$$C = \frac{A \varepsilon \gamma}{4\pi} \int_{R_1}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_{\theta_1}^{\pi/2} \exp(-\mu \rho_e R) \exp[-\mu(\rho_a - \rho_e)h / \cos \theta] \sin \theta d\theta d\varphi dR \quad (31)$$

A Figura 2.9 mostra os limites de integração em  $R$  e  $\theta$  e o volume da fonte incluído na integral, quando a mínima distância  $d$  atravessada pelo raio gama através da fonte é mantida constante.



**Figura 2.9** Limites de integração de  $R$  e  $\theta$ . As áreas hachuradas indicam o volume da fonte incluído nas integrais dadas por (31)

Resolvendo as integrais em  $R$  e  $\varphi$  :

$$C(h, d, \theta_1) = \frac{A\varepsilon\gamma}{2\mu\rho_e} \exp(-\mu\rho_e d) \int_1^\infty \cos\theta_1 \exp\left(\frac{-\mu\rho_a h y}{\cos\theta_1}\right) \frac{dy}{y^2} \quad (32)$$

A equação (32) dá a razão de contagem fora do volume do círculo de investigação de raio  $r = h \tan\theta_1$ .

Para determinar a intensidade vinda do volume do círculo (Figura 2.10), deve-se subtrair (32), avaliada para  $d=0$ ,  $\theta_1 \neq 0$ , e para  $d \neq 0$ , e  $\theta_1=0$ , da intensidade total dada no caso em que  $d=0$ ,  $\theta_1=0$ , e adicionar o valor para  $d \neq 0$ ,  $\theta_1 \neq 0$ , isto é:

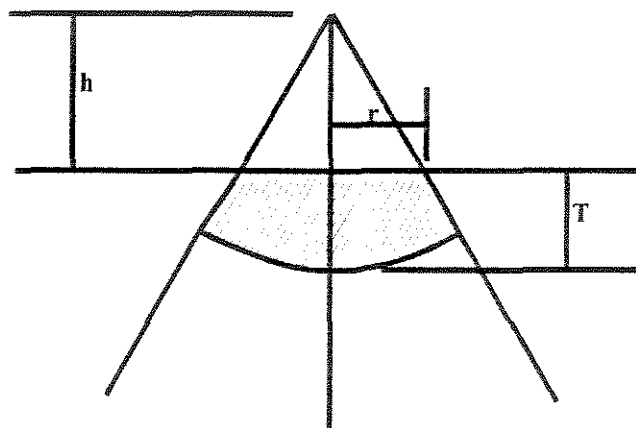
$$C(h, r) = C(h, 0, 0) - C(h, 0, \theta_1) - C(h, d, 0) + C(h, d, \theta_1) \quad (33)$$

Os resultados de Duval et al. (1971) mostraram que o campo da fonte infinita é significativamente afetado pela densidade do ar e independente da densidade do material da fonte

Para uma porcentagem constante do campo da fonte, o círculo de investigação medido em unidades de  $h$  aumenta à medida que a altitude decresce. Já a área do círculo não depende fortemente do coeficiente de atenuação para valores de 0,03 a 0,05 cm<sup>2</sup>/g (energias de 1,5 a 3,0 MeV).

Para uma medida gamaespectrométrica estacionária sobre uma fonte homogênea, é apropriado considerar-se a resposta de fontes circulares, desde que todos os pontos equidistantes do ponto de medida tenham a mesma contribuição. Já para medidas ao longo de uma linha de vôo, é apropriado considerar a resposta de uma série de bandas ou faixas paralelas à linha (Grasty et al., 1979).

Os diâmetros dos círculos contribuindo com uma porcentagem fixa da radiação detectada por uma fonte infinita não são fortemente dependentes da resposta do detector. Isto deve-se ao fato de que é somente para grandes ângulos do eixo do detector que a sensibilidade é significativamente reduzida e nestes ângulos, devido ao efeito da atenuação do ar, relativamente poucos raios gama alcançam o detector.



**Figura 2.10** Intensidade do volume do círculo. As áreas hachuradas indicam o volume da fonte de material para a equação (33). T é a distância constante atravessada pelos raios gama

Para linhas de vôo, a largura da faixa produzindo uma porcentagem fixa da radiação total detectada ao longo de toda a linha é significativamente menor que o diâmetro de um círculo produzindo a mesma porcentagem da radiação detectada por um detector estacionário. Isto deve-se ao fato que, integrando-se a resposta do detector para fontes circulares ao longo da linha de vôo, o mesmo ponto na superfície é amostrado muitas vezes e pontos mais próximos à linha geram repetidamente uma maior contribuição à contagem detectada que aqueles afastados.

Fazendo-se um estudo dos parâmetros que aparecem na modelagem matemática, tais como coeficientes de atenuação, densidades e distâncias, pode-se estimar teoricamente a absorção de uma camada de vegetação. Ferraz et al. (1979), mostraram que, para energias acima de 0,6 Mev os coeficiente de atenuação não têm muita variação frente a meios diferentes. Assim, com elementos como Th, U e K, que têm alta energia, pode-se estimar uma média para este coeficiente, mesmo numa floresta bem diversificada, e então aplicar o modelo.

## 2.2. Geologia da área de trabalho

A área de estudo localiza-se na região do Quadrilátero Ferrífero (MG), Mineração Morro Velho, especificamente na Mina Itajobi, próxima à cidade de Santa Bárbara, como mostra a Figura 2.11.

Esta área foi escolhida devido ao tipo de vegetação, Mata Atlântica (há locais onde a vegetação é bastante densa, bem como onde não há vegetação) e às diferenças litológicas que poderiam auxiliar na aquisição de dados. A literatura geológica sobre a área é bastante restrita, podendo-se citar, por exemplo, Takai et al. (1991).

O *greenstone belt* Supergrupo Rio das Velhas corresponde estratigraficamente ao Supergrupo Rio das Velhas e é formado por uma sucessão de rochas metassedimentares e metavulcânicas submetidas à deformação e metamorfismo intensos durante evento orogênico ocorrido no Arqueano (2700 Ma) (Hildebrand, 1993). É dividido nos Grupos Nova Lima e Maquiné, reconhecidos como parte de um *greenstone belt*. O Grupo Nova Lima (Dorr 1969) é a unidade hospedeira da maioria das mineralizações de ouro conhecidas na região do Quadrilátero Ferrífero. É predominantemente constituído por metassedimentos do tipo clorita-sericita-quartzo-filito e xisto, metavulcânicas e litótipos como grauvaca, quartzito, formação ferrífera de fácies carbonática, metachert, filito carbonoso/grafitoso e tilóide. O Grupo Maquiné é de caráter molássico, constituído por filitos, quartzo-filitos protoquartzitos, grauvacas a subgrauvacas e conglomerados, distribuídos nas Formações Palmital e Casa Forte, atingindo uma espessura da ordem de 1800 metros.

A área de trabalho situa-se dentro dos limites da Mina Itajobi, no Grupo Nova Lima. Este foi dividido informalmente (Dorr et al., 1957; Dorr, 1969) nas unidades Santa Quitéria, Córrego do Sítio e Mindá, esta última não ocorrendo na área.

#### Unidade Santa Quitéria (Silva, S. 1991)

O nome provém da mina homônima, onde se encontra a área-tipo da unidade, localizada na região central da folha Santa Bárbara. É representada basicamente por metassedimentos químicos e clásticos finos metamorfizados no fácies xisto verde.

A fração clástica é representada por xistos muito finos tendo como constituintes principais clorita e sericita. Apresentam cores variadas de acordo com o grau de intemperismo e das porcentagens de carbonato, material carbonoso, óxidos de ferro e quartzo. Intercalam-se nesses xistos, lentes de xisto/filito carbonoso, formação ferrífera bandada (FFB) e metachert.

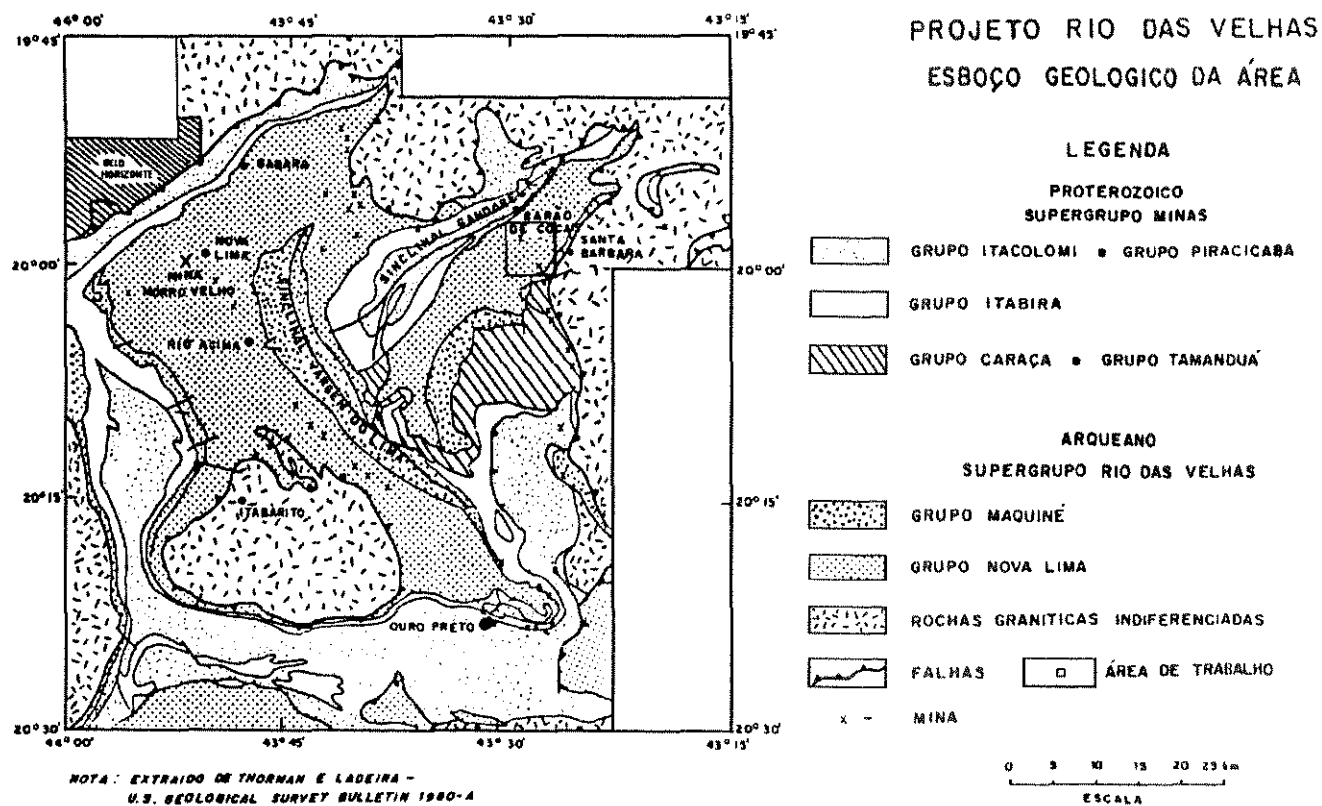


Figura 2.11 - Região coberta pelo Projeto Rio das Velhas  
e localização da área de pesquisa (Mina Itajobi)



O filito carbonoso tem cor variando de cinza escuro a negro, granulação muito fina e brilho sedoso. A textura é lepidoblástica fina e a composição mineralógica sericita, rutilo opaco e material carbonoso. O metachert é caracterizado pela coloração branca leitosa e pela granulação extremamente fina; algumas vezes mostra-se avermelhado devido à impregnação por óxidos de ferro. As formações ferríferas têm larga distribuição na unidade e, na maioria das vezes, se comportam como horizontes-guias litológicos na prospecção de ouro, tal como nos denominados alinhamentos de São Bento e Brumal. São caracterizados pelo bandamento milimétrico a centimétrico, pela cor marrom-escuro passando a amarelo-avermelhado com o intemperismo, resultando da alternância de bandas ricas em óxidos de ferro (magnetita, hematita) e bandas quartzosas. A composição modal aproximada de uma amostra da FFB do alinhamento São Bento apresenta 60% de quartzo, 38% de opaco (magnetita/martita) e 2% de limonita.

A unidade é interpretada como constituída por uma alternância de sedimentos químicos-exalativos e sedimentos clásticos finos depositados em fundo oceânico. É caracterizada por uma faixa de radiação potássica baixa da ordem de 20 a 30 cps.

#### Unidade Córrego do Sítio (Silva, S. 1991)

O nome provém da mina de mesma denominação, onde está a área-tipo. Localiza-se no alto curso do córrego homônimo, município de Santa Bárbara, canto nordeste da Folha Conceição do Rio Acima.

Os metassedimentos que a compõem são metapelitos bandados com lentes subordinadas de metapsamitos além de níveis de xisto delgados carbonoso e FFB (essa última na área-tipo). Os metapelitos exibem uma alternância rítmica de bandas siltosas milimétricas e centimétricas com bandas argilosas (micáceas). A composição mineralógica predominante é clorita, mica branca e quartzo como minerais essenciais e opaco, rutilo e zircão como minerais secundários. Têm textura lepidoblástica e lepidogranoblástica fina. Por vezes, o xisto carbonoso mostra também um bandamento milimétrico, onde se intercalam bandas quartzosas com bandas micáceas. Algumas amostras estudadas mostraram conteúdos de até 90% de clorita e estão sendo interpretadas como produtos de alterações metamórficas hidrotermais. Dentre as feições primárias destacam-se a alternância de pelitos e psamitos com

acaramento gradacional e, na área-tipo, estratificações plano-paralelas e cruzadas. Estas feições são compatíveis com as dos modelos propostos para as sequências turbidíticas.

Esta unidade é caracterizada por um gradiente de radiação média/alta da ordem de 30 a 40 cps, onde valores abaixo da faixa da unidade (abaixo de 2 cps) estão relacionados com coberturas lateríticas (canga), área inundada de represa, etc..

#### Unidade Mindá (Silva, S. 1991)

Localiza-se ao norte da represa de Peti, município de São Gonçalo do rio Abaixo, no canto nordeste da folha. É constituída basicamente por (clorita-sericita/muscovita)-quartzo xisto (metapsamito) com composição modal estimada média de 55 % de quartzo, 43 % de mica branca e clorita, 2 % de opacos e traços de zircão e turmalina. A unidade é caracterizada ainda pelo domínio psamítico sobre o pelítico, pela escassez de estruturas sedimentares, pelo bandamento composicional, pelo acaramento gradacional, pela presença de muscovita em agregados centimétricos, pela quantidade de quartzo de segregação e pela assinatura geofísica onde é verificado um enriquecimento de urânio e tório similares aos valores apontados para o Granito Peti com o qual faz contato.

### 3. Materiais e métodos

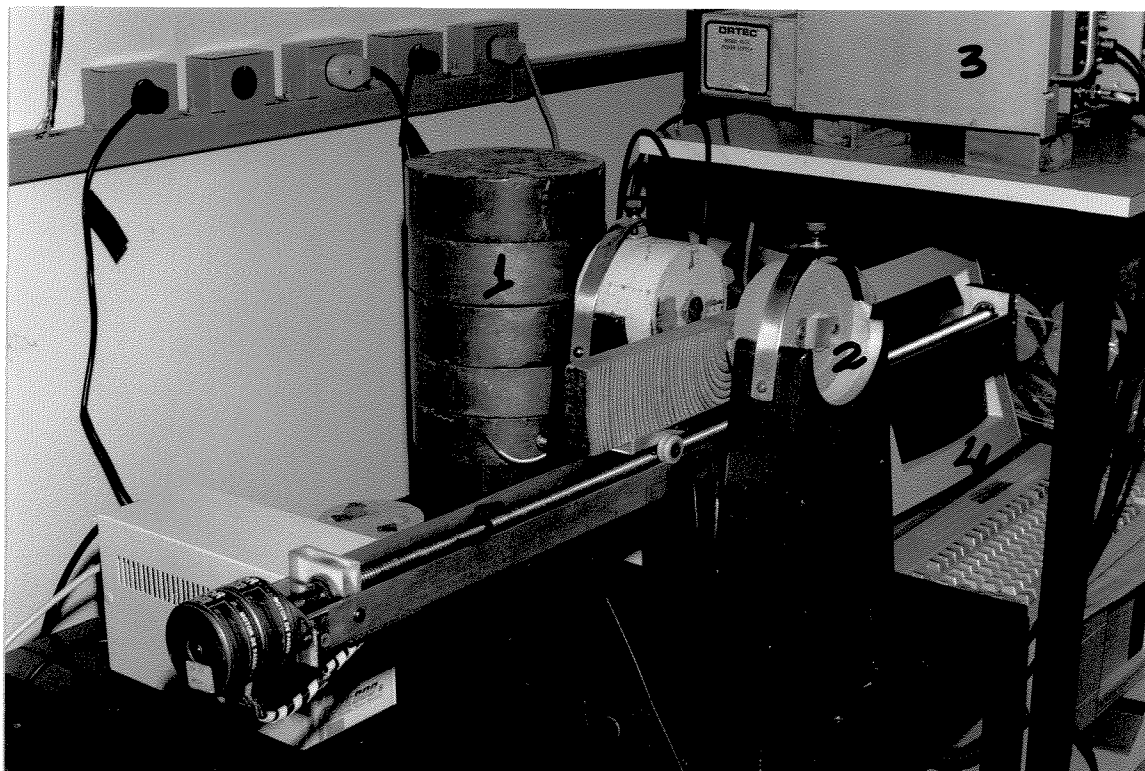
As medidas dos coeficientes de atenuação de massa de elementos presentes numa floresta, particularmente da região do Quadrilátero Ferrífero, foi realizada no CENA (Centro de Energia Nuclear na Agricultura), localizado na cidade de Piracicaba-SP, instituição pertencente à USP.

A etapa de campo, realizada na região acima citada, constou de medidas da radiação gama dos elementos K, U e Th. Os dados de aerogamaespectrometria foram utilizados para comparação com os terrestres.

#### 3.1. Materiais

##### Laboratório

Para a detecção e contagem da radiação na determinação do coeficiente de atenuação de massa, utilizou-se o aparato da Figura 3.1 abaixo:



**Figura 3.1** Equipamento utilizado

- 1) blindagem de chumbo com detector de NaI(Tl);
- 2) fonte de Amerício 241;
- 3) amplificador;
- 4) micro IBM-286 com programa específico para contagem dos pulsos de radiação;
- 5) trilho para colocação das amostras.
- 6) dimensões:
  - distância fonte-detector  $\cong 6,30$  cm;
  - distância da abertura da fonte à abertura do detector  $\cong 5,30$  cm;
  - comprimento do trilho = 100 cm;
  - diâmetro da blindagem = 16 cm;
  - altura da blindagem = 40 cm;
  - altura da fonte e detector = 39 cm.

Características da fonte de  $^{241}\text{Am}$ :

- energia do gama = 0,0595 MeV;
- atividade atual = 100 mCi;
- volume efetivo da fonte:
  - \*diâmetro efetivo = 7,5 mm;
  - \*altura efetiva = 3,0 mm;
  - \*área transversal = 7,1 mm<sup>2</sup>;

O espectro do  $^{241}\text{Am}$  possui várias energias de radiação gama: 0,0595 MeV, (35,9 %), 0,026 MeV (2,5 %); 0,033 (0,11 %); 0,043 (0,07 %); 0,099 MeV (0,023 %) e 0,103 MeV (0,019 %). Destes, o fotopico utilizado foi o de 0,0595 MeV por ser o de maior intensidade.

O programa registra as intensidades de radiação e, sendo feitas no mínimo 3 medidas num mesmo ponto, fornece o desvio-padrão e coeficiente de variação da medida.

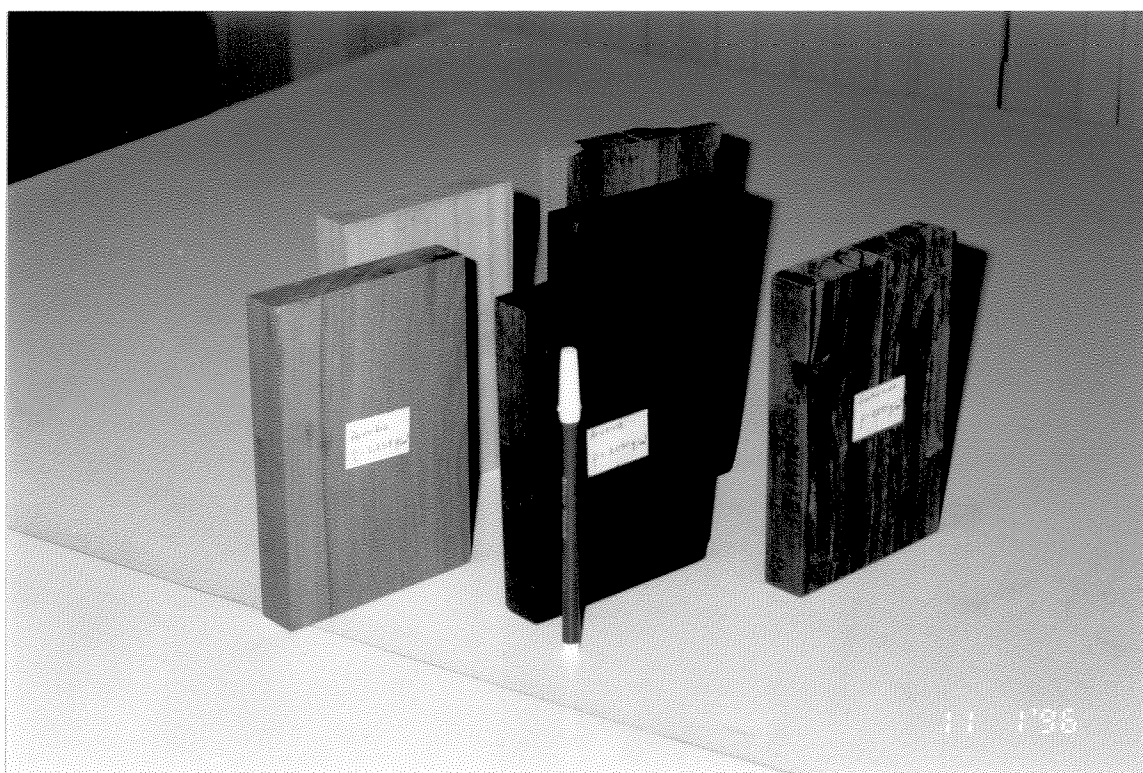
Grupo de amostras utilizadas:

Grupo 1- 39 espécies diferentes de madeiras pertencentes ao mostruário do CENA/USP, com dimensões aproximadas em 16 x 11 x 2,5 cm (Figura 3.2);

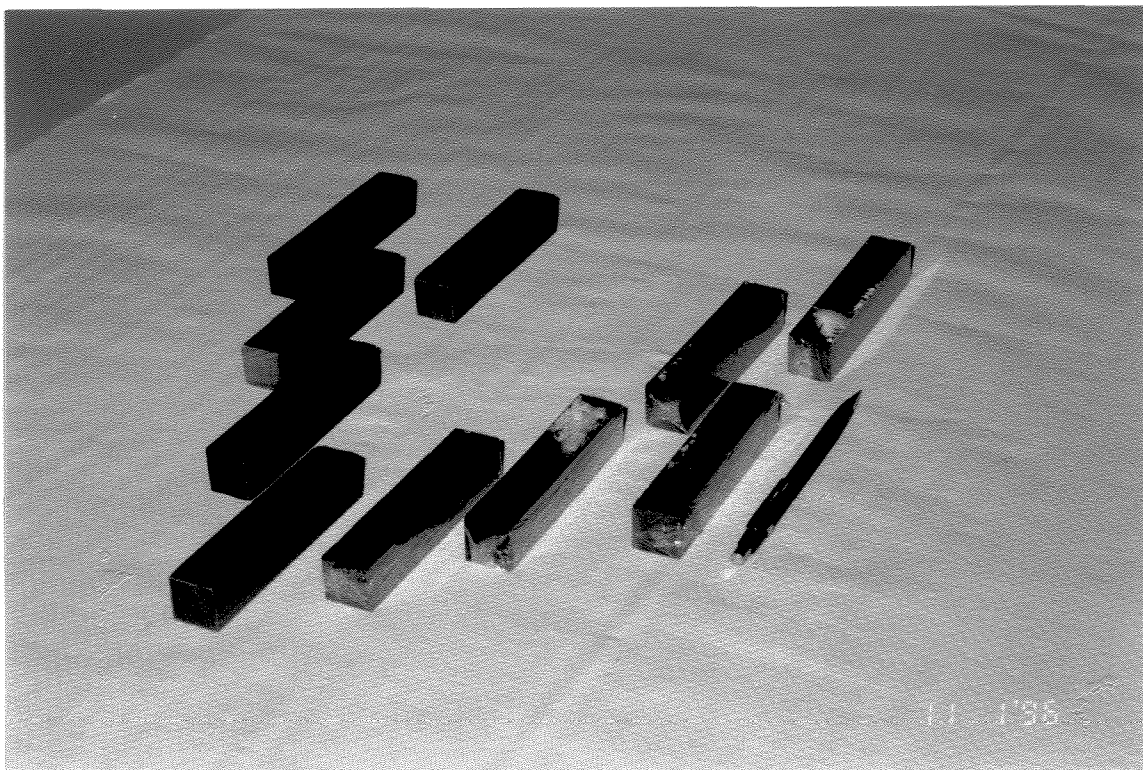
Grupo 2- 21 pequenos blocos de madeira “ipê” e “mogno” com aproximadamente 10 x 2 x 2 cm (Figura 3.3);

Grupo 3- pastilhas cilíndricas feitas a partir das amostras do grupo 2 com 3 cm de diâmetro e altura variando entre 0,5 e 1,3 cm;

Grupo 4- pastilhas feitas a partir de diferentes espécies de folhas presentes na Mata Atlântica: *Trichilia cf. elegans* A. Juss., *Dendropanax cuneata* (Maria Mole), *Copaifera langsdorffii* Desf. (Copaíba), *Ezenbeckia febrifuga*, *Chrysophyllum gonocarpum* (Caxeta).



**Figura 3.2** Amostras do grupo 1



**Figura 3.3** Amostras do grupo 2

### **Levantamento terrestre**

O espectrômetro utilizado para as medidas de campo foi o modelo GAD-6 da Scintrex, cedido pelo IAG/USP, com as seguintes características: portátil, digital, com 4 canais, estabilizador espectral, estabilizador de raios gama que permite análise de energia integral ou diferencial, contagem digital em 4 canais simultaneamente, correção para efeito Compton. O cristal do detector de NaI(Tl) tem 358 cm<sup>3</sup> de volume.

O aparelho foi previamente calibrado pelos técnicos do IAG nos *pads* localizados no IRD (Instituto de Radiação e Dosimetria), Rio de Janeiro.

Fatores de sensibilidade:

$$K_1(\text{Th}) = 0,126 \text{ cps/ppm}$$

$$K_2(\text{U}) = 0,360 \text{ cps/ppm}$$

$$K_3(\text{K}) = 3,400 \text{ cps/ppm}$$

Razões de *stripping*:

$$\alpha = 0,69624$$

$$\beta = 0,86310$$

$$\gamma = 0,81530$$

O equipamento utiliza as seguintes janelas para as medidas:

	Intervalo de energia (MeV)	Largura da janela (MeV)
<b>C.T.</b>	0,800 - 2,770	1,970
<b>K</b>	1,380 - 1,560	0,180
<b>U</b>	1,660 - 1,900	0,240
<b>Th</b>	2,440 - 2,770	0,330

Para localização foram utilizados dois Receptores de Sinais de Satélite GARMIN, modelo GPS 45.

### Levantamento aéreo

Foram utilizados dados aéreos de gamaespectrometria e magnetometria do Projeto Rio das Velhas, realizado no período de 17 de julho a 4 de outubro de 1992, período com baixo índice pluviométrico, na região do Quadrilátero Ferrífero (MG), resultado do interesse do DNPM e de um grupo de mineradoras, em aumentar a exploração mineral na região do Quadrilátero Ferrífero, enfatizando o ouro. A área selecionada compreendeu o *greenstone belt* Rio das Velhas, localizado entre as cidades de Belo Horizonte, Barão de Cocais, Ouro Preto e Itabirito, totalizando cerca de 1700 km<sup>2</sup>.

Utilizou-se, para os levantamentos aerogeofísicos, um helicóptero de grande porte, Bell 212, espectrômetro EXPLORANIUM, modelo GR-820 de 256 canais espectrais, associado a um detector EXPLORANIUM GPX-1024, com volume de 1024 polegadas cúbicas de NaI(Tl).

Os dados aéreos do Projeto compreenderam o recobrimento de 6.726 km de perfis aerogeofísicos com emprego simultâneo dos métodos magnético, gamaespectrométrico e eletromagnético, planejados segundo as características geológicas das unidades de interesse para a prospecção, compreendendo uma superfície total de aproximadamente 1.700 km<sup>2</sup>. As linhas de voo foram espaçadas de 250 m estando o gamaespectrômetro a uma altura de 60m e o helicóptero a 70 m,

aproximadamente. A intensidade das radiações gama associada aos canais de potássio, urânio, tório e contagem total foi dada cps.

A empresa responsável pelo levantamento aéreo (GEOMAG - RJ) executou as correções para o *background*, com base na amostragem realizada no início e final de cada voo, efeito Compton, com as constantes  $\alpha = 0,27$ ,  $\beta = 0,427$  e  $\gamma = 0,753$  e correção altimétrica, resultando nos seguintes valores para os coeficientes de atenuação:

$$\mu_{Th} = 0,00378 \text{ m}^{-1}$$

$$\mu_U = 0,00362 \text{ m}^{-1}$$

$$\mu_K = 0,00329 \text{ m}^{-1}$$

$$\mu_{C.T.} = 0,00372 \text{ m}^{-1}$$

No caso do projeto Rio das Velhas, não se conhece suficientemente os procedimentos utilizados, tanto na calibração do equipamento, visto não existirem *pads* para aeronaves em nosso país, como também nas correções para as medidas aéreas

Os resultados do projeto foram apresentados na forma de um relatório e mapas das intensidades radiométricas dos canais de potássio, urânio, tório e contagem total, nas escalas de 1:25.000 e/ou 1:100.000, além dos mapas gamaespectrométricos dos quatro canais e mapa ternário.

As janelas do espectrômetro aéreo foram:

	Intervalo de energia (MeV)
<b>C.T.</b>	0,410 - 2,820
<b>K</b>	1,360 - 1,570
<b>U</b>	1,670 - 1,880
<b>Th</b>	2,400 - 2,820

Para o processamento dos dados geofísicos e editoração final do trabalho, foram utilizados vários laboratórios e programas:

**LEI** - Laboratório de Ensino Informatizado - IG/UNICAMP;

**LEG** - Laboratório de Editoração Gráfica - IG/UNICAMP.

**LAPIG** - Laboratório de Processamento de Imagens Georeferenciadas



**SURFER for WINDOWS** - para interpolação em malha regular e desenho de mapas de curvas de isovalores ou blocos-diagrama;

**EXCEL for WINDOWS** - para análise de dados numéricos e elaboração de tabelas e gráficos;

**WORD for WINDOWS** - para elaboração do texto;

**COREL DRAW** - para a elaboração de figuras;

**IMAGENS LANDSAT TM da região do Quadrilátero Ferrífero** - para se aplicar a correção do efeito de blindagem da vegetação. A imagem utilizada, no formato digital, refere-se a um corte (1024 x 1024 pixels) de uma cena completa com sete bandas, referentes a órbita 217, ponto 74, com elevação solar de 32°, adquiridas em 18 de junho de 1985, com 0% de cobertura de nuvens (na época da aquisição destas imagens a Mina Itajobi existia).

Nesta etapa de campo, contou-se também com informações cedidas pelos geólogos da Mina Itajobi.

### **3.2 Métodos**

#### **Laboratório**

Primeiramente, fez-se medidas da ruído de fundo do ambiente de laboratório, na ausência de qualquer amostra. As amostras foram pesadas e suas dimensões medidas com um paquímetro, para que se pudesse determinar o volume e densidade  $\rho$ .

Para qualquer das amostras, a metodologia utilizada foi a mesma, variando-se somente o número de pontos e o tempo de medida.

Depois a amostra foi colocada sobre o trilho entre a fonte e o detector. No caso das amostras do grupo 1 (39 espécies de madeira distintas), a escolha dos pontos na sua superfície foi praticamente aleatória e a medida efetuada movendo-se cada madeira ponto a ponto. Nas espécies menos homogêneas foi feito um maior número de pontos (~ 30 pontos) para que o erro das medidas fosse menor, já que essas apresentam muitos veios e densidade variada em pequenas áreas; nas demais foram feitos 15 pontos. Cada medida teve duração de 30 segundos, ponto a ponto.

As amostras do grupo 2 (pequenos blocos de ipê e mogno) foram dispostas sobre o trilho lado a lado, e as medidas realizadas de modo a se ter um perfil, ou seja, 3 medidas de 20 segundos a cada 0,5 mm.

Após medir-se os 21 pequenos blocos de cada uma das 2 espécies, uma parte, 7 amostras, foi colocada em estufa para secagem e obtenção de um teor mínimo de umidade; outra parte (7) foi saturada de água para se chegar a 100 % de umidade, e a terceira parte (7), foi moída e transformada em pastilhas prensadas de 3 cm de diâmetro e diferentes espessuras, constituindo esta última, as amostras do grupo 3 já citado.

Nas amostras do grupo 3, foram escolhidos 15 pontos e feita uma medida em cada um. Isto foi suficiente, já que a homogeneidade era grande. Este mesmo método foi aplicado nas amostras do grupo 4, composto por folhas de espécies de árvores encontradas na região onde se realizariam as medidas de gamaespectrometria.

As espécies de árvores presentes na região de campo (vegetação tipo Mata Atlântica) foram identificadas pelo biólogo Jorge Yoshio Tamashiro do IB/UNICAMP, e em seguida, com sua ajuda, as folhas foram colhidas na mata de Santa Genebra, em Campinas. As folhas foram secas, moídas e prensadas na forma de pastilhas.

De posse de todos os dados calculou-se o coeficiente de atenuação de massa (seção 2.1.3):

$$I(x) = I(0) \exp(-\mu\rho x) \quad (34)$$

Invertendo e aplicando o ln em ambos os lados:

$$\frac{I(x)}{I(0)} = \exp(-\mu\rho x) \Rightarrow \ln \frac{I(0)}{I(x)} = \mu\rho x \quad (35)$$

Portanto:

$$\mu = \ln \frac{I(0)/I(x)}{\rho x} \quad (36)$$

onde  $\mu$  é o coeficiente de atenuação de massa [ $\text{cm}^2.\text{g}$ ],  $I(0)$  é a intensidade do feixe incidente,  $I(x)$  é a intensidade emergente atenuada pela amostra,  $\rho$  é a sua densidade ( $\text{g.cm}^{-3}$ ) e  $x$  é a espessura (cm).

### Campo

A etapa de campo realizou-se na região do Quadrilátero Ferrífero, próximo à cidade de Santa Bárbara (MG), no final do mês de agosto de 1996.

Limites (em UTM) da área onde foi efetuado o levantamento (ver Anexo 2):

656500 E - 7786000 N

658500 E - 7789000 S

Devido a dificuldade de acesso às propriedades da região (fazendas) e em virtude da área ser muito montanhosa, as medidas gamaespectrométricas terrestres foram realizadas dentro dos limites da Mina Itajobi, próximo à cidade de Santa Bárbara, e acompanhadas por técnicos da própria mineradora (Figura 3.4).



**Figura 3.4** Vista parcial da Mina Itajobi

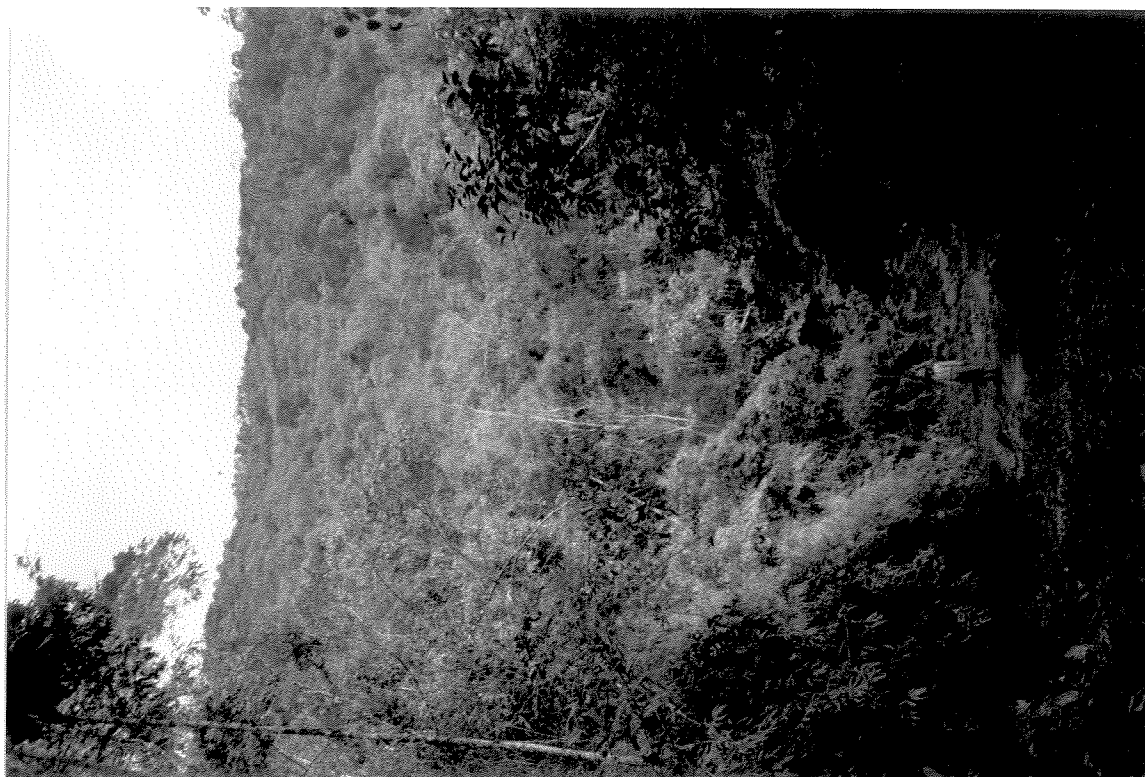
Com o objetivo de se fazer uma comparação entre esses dados terrestres e os aéreos do Projeto Rio das Velhas, as medidas foram realizadas em pontos situados em locais onde haviam sido feitas medidas aéreas, ou seja, onde passavam linhas de voo. Estas foram traçadas em um mapa da região cedido pela Mina Itajobi. Assim, de

posse das coordenadas de cada ponto de uma linha de vôo, foi feito um reconhecimento da área a fim de se verificar os locais onde a vegetação era mais favorável e o terreno não muito acidentado.

Foram escolhidos 30 pontos em áreas com e sem vegetação. As Figuras 3.5 e 3.6 dão uma idéia da vegetação existente na área. As medidas da radiação gama do potássio, urânio e tório foram obtidas em cps (contagens por segundo), durante 5 minutos cada. Fez-se também uma medida sobre um corpo de água a fim de se obter a correção para o *background*.

Como a umidade do ar interfere nas medidas, mediu-se a umidade relativa, que teve uma média de 88 %; a umidade absoluta foi de  $12,89 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^3$ .

Depois de adquiridos os dados terrestres, estes foram transformados em ppm para o U e Th, e % para o K.



**Figura 3.5** Vegetação existente na área de campo



**Figura 3.6** Tipo de vegetação na área de campo

Para a utilização dos dados do Projeto Rio das Velhas, o analista de sistemas Moacir Cornetti e a Profa. Dra. Elisabete Pascholati elaboraram um programa que pudesse retirar as informações necessárias da fita original, como coordenadas, número da linha de voo, contagens, etc.. Em seguida os dados gamaespectrométricos foram transformados em teores (ppm para o U e Th e % para o K), transformando-os de qualitativos em “semi-quantitativos” (Pascholati, E. M., Amaral, G.). Diz-se “semi-quantitativos” por não se conhecer suficientemente a metodologia utilizada nas correções dos dados aéreos. Como só existiam 29 pontos de medidas terrestres, não

foi difícil achar seu correspondente, pelas coordenadas, entre os pontos de medidas aéreas.

A utilização do programa SURFER permitiu a elaboração de *grids* e, posteriormente, de isolinhas para os vários elementos radioativos e respectivas razões.

Tentou-se corrigir a aerogamaespectrometria para efeitos de água/vegetação a partir de imagens LANDSAT TM da região do Quadrilátero Ferrífero, com base nos trabalhos de Lavreau & Alonso (1991). Esse procedimento foi utilizado pela pós graduanda Maria Irian M. Duarte. Previamente fez-se a correção atmosférica, georeferenciamento e reamostragem na imagem para registro com a aerogeofísica. Utilizou-se Tasseled Cap Wetness, segundo a recomendação de Crist et al. (1986):

$$TCW = TM1*0,1446 + TM2*0,1761 + TM3*0,3322 + TM4*0,3396 + TM5*0,6210 + TM7*0,4186 - \text{termo constante}$$

A seguir, foram feitos os "scattergramas" K x TCW, U x TCW e Th x TCW. As porções mais secas da superfície (campo, cerradinho, solo exposto, etc.) tendem a apresentar TCW menores e teores maiores dos elementos radioativos. Através de regressão linear simples ou mesmo manualmente, determina-se o coeficiente angular das retas ( $S_{Xi}$ ) e a média dos pixels "secos" ( $TCW_{0i}$ )  $i = K, U, Th$ . Com estes valores procede-se à correção da aerogeofísica:

$$K_{corr_{pixel}} = K_{abs_{pixel}} - (TCW_{pixel} - TCW_{0K}).S_{XK}$$

$$U_{corr_{pixel}} = \dots$$

$$Th_{corr_{pixel}} = \dots$$

Apesar de terem sido seguidos à risca os procedimentos de Lavreau & Alonso (1991), não se observou correlação negativa entre os teores e TCW. Novas tentativas (Duarte, M. I. M., Miranda, R. M., Amaral, G., Pascholati, E. M.) serão desenvolvidas com imagens de outra época e utilizando-se um índice de vegetação mais adequado, como o NDVI (normalized Difference Vegetation Index)

$$NDVI = TM4 - TM3 / TM3 + TM4$$

A Figura A12 do Anexo 1 mostra a distribuição do NDVI para a área de estudo, apenas para ilustrar a distribuição da vegetação. Tonalidades mais claras correspondem a uma maior densidade da cobertura vegetal.

#### 4. Resultados e discussão

##### 4.1. Laboratório

A Tabela 4.1 mostra os 39 tipos de madeira utilizados e os resultados obtidos. As densidades variam de 0,388 a 1,093 g/cm<sup>3</sup>. As amostras não têm grande variação na espessura.

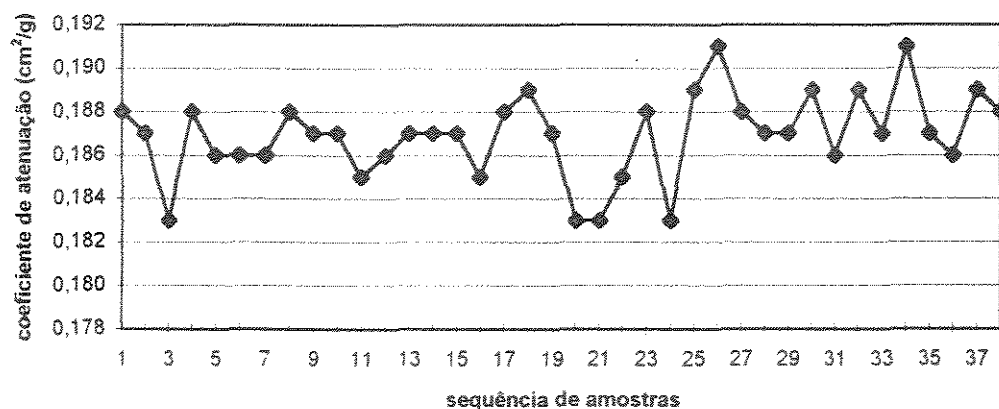
**TABELA 4.1** Amostras utilizadas e resultados obtidos

	amostras	espessura (cm)	densidade (g/cm <sup>3</sup> )	coef. de at. (cm <sup>2</sup> /g)
1	gonçalo alves	2,44	1,093	0,188
2	arueira	2,35	1,092	0,187
3	sucupira	2,46	1,050	0,183
4	guarantã	2,46	1,029	0,188
5	eucaliptus grd 1	2,28	0,987	0,186
6	ipê	2,44	0,948	0,186
7	canelão	2,32	0,940	0,186
9	castanheira	2,39	0,928	0,188
10	angico	2,45	0,911	0,187
11	jacarandá da bahia	2,35	0,907	0,187
12	cabreuva	2,33	0,900	0,185
13	guaiuvira	2,47	0,868	0,186
14	caviuna	2,39	0,862	0,187
15	amendoim	2,42	0,855	0,187
16	jacarandá paulista	2,33	0,855	0,187
17	louro	2,48	0,836	0,185
18	araruva	2,48	0,813	0,188
19	jatobá	2,44	0,799	0,189
20	pau marfim	2,83	0,767	0,187
21	óleo de copaiba	2,29	0,762	0,183
22	perobinha	2,33	0,762	0,183
23	peroba	2,36	0,760	0,185
24	cabreutinga	2,43	0,753	0,188
25	canela	2,46	0,732	0,183
26	imbuia	2,28	0,715	0,189
27	pau d'alho	2,30	0,669	0,191
28	mogno	2,52	0,669	0,188
29	jequitibá branco	2,35	0,653	0,187
30	guatambú	2,30	0,633	0,187
31	grevilha	2,58	0,607	0,189
32	cedro	2,30	0,583	0,186
33	pinho (araucária)	2,33	0,581	0,189
34	frejó	2,32	0,571	0,187
35	pinus caribea	2,62	0,561	0,191
36	cerejeira	2,46	0,559	0,187
37	jequitibá rosa	2,33	0,515	0,186
38	caxeta	2,49	0,483	0,189
39	timburi	2,30	0,388	0,188
	média	2,41	0,774	0,187
	desvio padrão	0,11	0,177	0,002



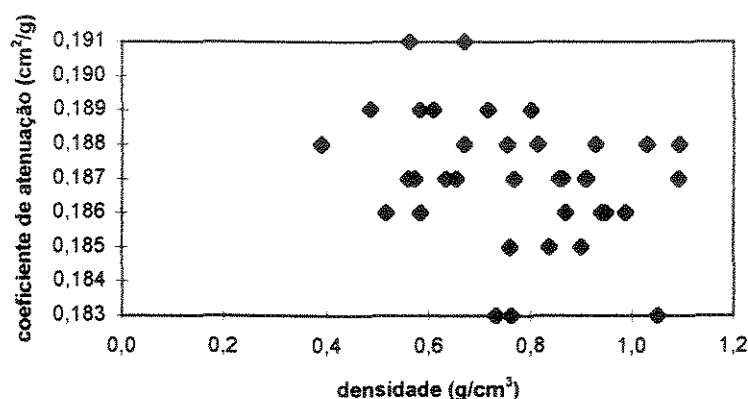
A Figura 4.1 mostra que a espécie da madeira, bem como sua densidade, não tem forte influência no valor do coeficiente de atenuação de massa, o qual foi de  $0,187 \pm 0,02 \text{ cm}^2/\text{g}$ .

**Figura 4.1** Sequência de amostras x coeficiente de atenuação de massa



Apesar da diferente estrutura das espécies de madeira, isto não influencia muito seu coeficiente de atenuação de massa. Algumas amostras apresentaram muitos veios e, conseqüentemente, variação da densidade no local, mas isto foi corrigido fazendo-se várias medidas na mesma amostra. Pela Figura 4.2 vê-se que o coeficiente de atenuação é pouco influenciado pela densidade, sendo o coeficiente de correlação de - 0.214, muito ruim e levemente inverso.

**Figura 4.2** Densidade x coeficiente de atenuação de massa



A fim de se verificar o método para medir o coeficiente de atenuação de massa das folhas de árvore, fez-se as medidas nos tocos de madeiras ipê e mogno. No perfil realizado com as 21 amostras em sequência, o coeficiente teve uma média de

0,180 cm<sup>2</sup>/g para o ipê e 0,175 cm<sup>2</sup>/g para o mogno, valores mais baixos que os anteriores (amostras grandes) devido à umidade das primeiras ser menor.

Já com as pastilhas feitas de uma parte dos 21 pequenos blocos, encontrou-se um coeficiente de 0,178 cm<sup>2</sup>/g para o ipê e 0,175 cm<sup>2</sup>/g para o mogno, ou seja, valores bastante semelhantes aos anteriores (amostras do grupo 2), provando-se assim que este método seria eficiente para as folhas.

A partir da parte dos pequenos blocos que foi seca, os resultados mostraram um coeficiente de atenuação de massa médio de 0,192 cm<sup>2</sup>/g para o ipê (6 % mais alto que para a madeira natural) e 0,193 cm<sup>2</sup>/g para o mogno (10 % mais alto que para a madeira natural). Isto pode ser explicado por ser o coeficiente de atenuação de massa inversamente proporcional à densidade, ou seja, na madeira seca a densidade sendo menor, o coeficiente é maior. Apesar disso, a falta de água causa uma menor atenuação.

Em Ferraz et al. (1979), mostra-se que o coeficiente de atenuação de massa de um material é calculado fazendo-se a somatória dos produtos do coeficiente de atenuação de massa pelo conteúdo do respectivo elemento químico presente, ou seja:

$$\mu = \sum_{i=1}^n (M_i \mu_i) = M_1 \mu_1 + M_2 \mu_2 + \dots + M_n \mu_n \quad (37)$$

Desta forma, entende-se que a interação da radiação gama com a matéria ocorre a nível nuclear e interage com um elemento sempre da mesma forma, estando ele, por exemplo, na água ou no ar. O problema centra-se no número de alvos por cm<sup>3</sup>. Na água existe um número maior de átomos de oxigênio/cm<sup>3</sup> e hidrogênio/cm<sup>3</sup> que no ar, fazendo com que a ela ofereça uma maior blindagem à radiação. Na madeira molhada aumenta o número de alvos por cm<sup>3</sup>, causando uma maior atenuação.

Não foi possível realizar as medidas nas amostras saturadas de água pois o equipamento apresentou problemas. Pode-se dizer, entretanto, que os valores destes coeficientes são próximos aos da água, ressaltando que o alto teor de água aumenta a atenuação.

Este resultado não é válido somente para a madeira, mas também para o solo, explicando o porquê de um baixo índice radioativo na superfície depois de uma chuva intensa: a umidade “blinda” a radiação impedindo que esta emane do solo.

Com as pastilhas de folhas foi encontrado um coeficiente de atenuação médio de 0,22 cm<sup>2</sup>/g (Tabela 4.2). O valor do coeficiente de atenuação de massa foi alto devido à umidade das pastilhas ser baixa. Comparando pastilhas de madeira e folhas secas, para as folhas o coeficiente de atenuação de massa é 19 % maior, mostrando que as folhas “blindam” menos a radiação que o tronco de uma árvore.

**TABELA 4.2** Espécies de folhas utilizadas e resultados obtidos

espécie	coef. de at. (cm <sup>2</sup> /g)
<i>Copaifera langsdorffii</i>	0,24
<i>Ezenbeckia febrifuga</i>	0,22
<i>Dendropanax cuneata</i>	0,21
<i>Chrysophyllum gonocarpum</i>	0,22
<i>Trichilia cf. elegans</i> A. Juss.	0,23
média	0,22
desvio padrão	0,01

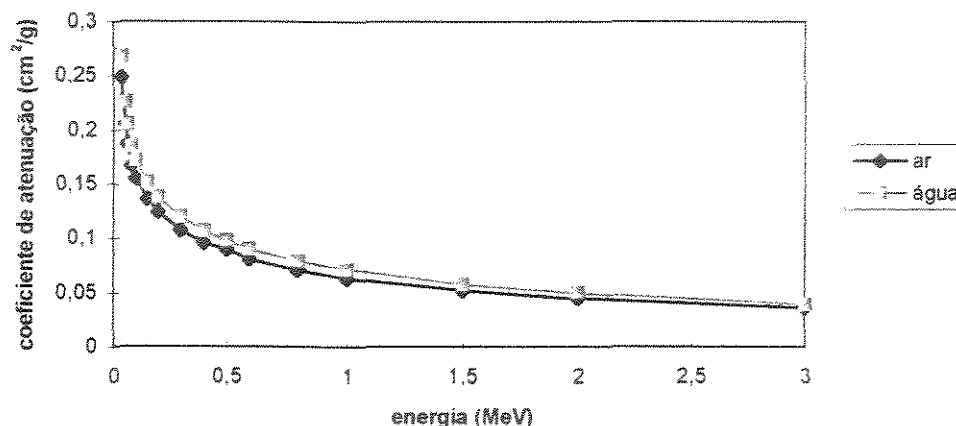
A Lei de Beer-Lambert, utilizada no cálculo do coeficiente de atenuação de massa, só é válida para fontes monoenergéticas. Segundo Ferraz et al. (1976), a fonte de <sup>241</sup>Am é a mais indicada para o trabalho, devido a sua longa meia vida, seu espectro monoenergético e maior sensibilidade nas determinações de umidade. A mesma fonte foi usada para a determinação do coeficiente de atenuação de alguns tipos de madeira, e densidade em qualquer ponto da amostra.

A Figura 4.3 mostra que o coeficiente de atenuação de massa varia muito mais para baixas energias. Comparando-se ar e água, o coeficiente decresce com a energia até um certo valor (0,6 MeV), a partir do qual permanece constante para os dois materiais. Entretanto os valores são sensivelmente mais altos para a água. Isto mostra que para baixas energias, o coeficiente de atenuação não varia muito de material para material. Sendo assim, se fosse utilizada uma fonte de 2 MeV para o trabalho, ao invés do <sup>241</sup>Am, não se conseguiria uma variação do coeficiente para os diferentes tipos de madeira.

Utilizando esta fonte, chegou-se a um coeficiente médio para os troncos e folhas de árvores, que são os principais componentes de uma floresta. Na prática, como os elementos radioativos naturais Th, U e K têm alta energia (em relação ao <sup>241</sup>Am), o coeficiente de atenuação para uma floresta aparentemente não vai variar

muito devido ao tipo de vegetação existente, como se pode observar pela figura 4.3. Assim, é possível fazer-se uma estimativa da atenuação da vegetação.

**Figura 4.3** Energia x coeficiente de atenuação de massa



Estes resultados dão uma estimativa de como se comporta a radiação na interação com troncos e folhas de árvores. Diz-se estimativa pois, para os troncos e folhas, a radiação que os atravessa na natureza tem geralmente energia maior (Th, U e K) e incidência em diversos ângulos diferentes. Antes da radiação atingir a árvore, ocorrem vários processos de interação da energia com a matéria e o ar. O coeficiente de atenuação de massa para a vegetação situa-se entre 0,051 e 0,049 cm²/g (energias de 1,46 e 2,62 MeV)

## 4.2. Campo

### Comparação entre dados terrestres e aéreos

O Anexo 2 apresenta um esboço do mapa geológico da área, segundo CPRM 1994, mostrando os pontos de medidas gamaespectrométricas e também as linhas de voo do Projeto Rio das Velhas.

A Tabela 4.3 mostra os dados terrestres e aéreos (Projeto Rio das Velhas), já corrigidos para o efeito Compton e *background*, transformados em teores.

Comparando-se os valores dos 29 dados terrestres e aéreos, verifica-se que para o tório, apenas 4 terrestres foram inferiores aos aéreos (em média os terrestres são 45 % mais altos) e, para o potássio, apenas 9 (em média os terrestres são 70 % mais altos).

TABELA 4.3 Dados de campo e dados aéreos

PONTO	LINHA	COORDENADA(UTM)	VEGETAÇÃO	C.T.(cps)	Valores de campo			Valores aéreos		
					Th(ppm)	U(ppm)	K(%)	Th(ppm)	U(ppm)	K(%)
1	40830	656990-7786150	alta	446	7.8	1.8	0.76	4.1	2.4	0.41
2	40830	656936-7786062	alta	446	7.4	1.7	0.39	4.3	2.3	0.45
3	40880	657613-7787320	média	466	6.5	1.9	0.77	5.3	1.9	0.41
4	40860	657062-7787127	alta	516	4.0	1.7	0.59	5.1	2.0	0.55
5	40860	657062-7787127	alta	516	8.6	1.9	1.40	5.1	2.0	0.55
6		657105-7787110	média	497	5.8	1.8	0.71	4.9	2.1	0.70
7	40850	656698-7787165	baixa	668	12.0	2.8	1.56	6.5	2.4	0.76
8	40850	656711-7787109	baixa	617	10.3	1.6	1.28	6.1	1.5	0.82
9	40850	656720-7786950	baixa	562	8.6	2.1	0.94	5.5	1.5	0.57
10	40870	657205-7787471	alta	675	8.2	1.1	0.96	6.1	2.5	0.81
11	40870	657190-7787500	alta	674	6.0	1.3	1.07	5.7	2.3	0.79
12	40870	657190-7787500	alta	674	3.3	1.7	0.41	5.7	2.3	0.79
13	40880	657137-7787890	alta	613	7.9	2.3	1.09	5.8	2.3	0.72
14	40880	657150-7787800	média	607	2.3	2.6	0.17	5.1	2.3	0.76
15	40870	657313-7787451	alta	480	7.2	1.3	0.80	5.0	2.2	0.40
16	40870	657313-7787452	alta	480	8.0	1.1	0.79	5.0	2.2	0.40
17		657500-7788100	média	631	7.9	2.1	1.36	5.3	2.7	0.70
18	40890	657386-7787902	média	696	11.0	2.0	1.42	6.2	2.7	0.94
19	40890	657500-7787850	alta	571	8.6	2.6	1.16	5.9	2.4	0.57
20	40910	657689-7788350	rala	574	9.7	2.2	1.01	6.6	2.5	0.52
21	40920	657954-7788550	alta	496	6.7	1.9	0.32	6.6	2.2	0.30
22	40920	657984-7787450	rala	556	9.0	1.6	0.43	7.0	2.1	0.51
23	40930	658100-7788690	alta	609	13.5	2.1	0.24	6.0	3.0	0.57
24	40930	658150-7788650	rala	578	16.8	1.8	0.15	8.2	2.1	0.40
25	40940	658400-7788750	alta	507	4.2	1.6	0.16	6.1	3.5	0.37
26	40940	658452-7788700	baixa	457	8.3	1.7	0.42	5.8	2.8	0.34
27	40900	657850-7787730	rala	458	3.4	0.8	0.05	4.6	1.9	0.32
28	40910	657915-7788068	rala	315	7.6	1.0	0.12	4.1	1.5	0.18
29	40840	656995-7786587	rala	637	9.8	2.2	2.40	4.6	2.3	0.82
média				552	7.9	1.8	0.79	5.6	2.3	0.57
desvio padrão				91	3.1	0.5	0.54	0.9	0.4	0.20

Quando se analisa o urânio verifica-se que 23 valores foram inferiores. Tal discrepância pode ter sua origem na calibração do equipamento utilizado no levantamento aéreo.

Para o equipamento usado nos dados aéreos, não se tem conhecimento de como foi feita a calibração, pois sabe-se dos valores dos fatores de *stripping* e coeficientes de atenuação, mas não as sensibilidades do cristal.

Quanto ao equipamento portátil, pode-se ter certeza da qualidade da calibração do equipamento, constantes de calibração, correções para *background* e dados obtidos.

As Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 mostram os valores terrestres em função dos aéreos, ponto a ponto.

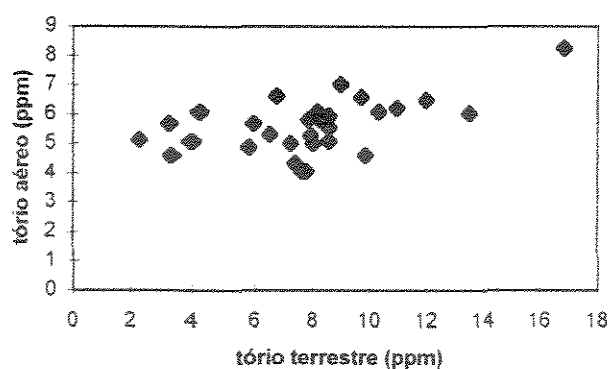
Pela matriz de correlação encontrou-se 0,624 para o potássio, 0,247 para o urânio e 0,543 para o tório. Como esta correlação indica o grau de associação entre os dois conjuntos de dados, pode-se dizer que os resultados são bons para o potássio e tório, o mesmo não acontecendo para o urânio. Assim sendo, vários fatores podem ser os responsáveis, por exemplo, vegetação, altitude, círculo de investigação entre outros.

Para a obtenção de maior correlação entre os resultados aéreos e terrestres, seria necessário que os equipamentos fossem calibrados de uma maneira semelhante, que as janelas de energia tivessem a mesma largura (aqui encontra-se uma diferença de 0,09 para a janela do Th, 0,03 para a janela do potássio, 0,03 para a janela do urânio e 0,44 para a contagem total).

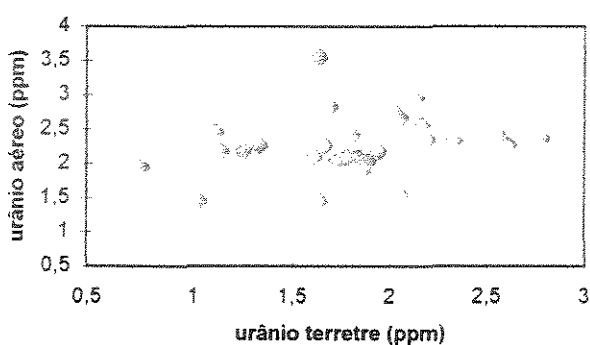
É importante salientar que as medidas terrestres são pontuais, o mesmo não acontecendo com as aéreas. Apesar disso, faz-se a análise dos dados aéreos considerando-se o estado estacionário. Assim sendo, uma medida realizada a 70 metros de altura, tem a contribuição de um cone de 140 metros de diâmetro, o chamado círculo de investigação (Pitkin et al, 1980).

A Figura 4.7 demonstra como as medidas se comportam, no caso de serem estacionárias. Para uma medida feita a 70 metros de altura, todo um campo de 70 m de raio vai contribuir, ou seja, um cone de 140 m de diâmetro e 70 de altura, o círculo de investigação), a medida terrestre é praticamente pontual.

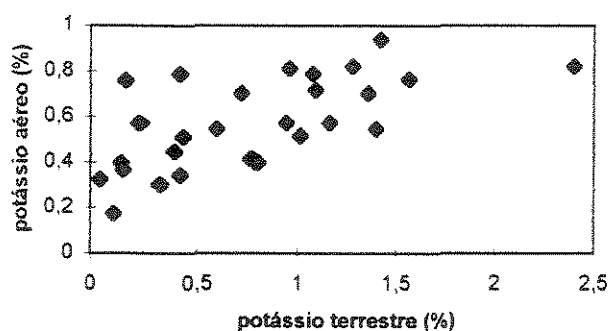
**Figura 4.4** Tório terrestre x tório aéreo



**Figura 4.5** Urânio terrestre x urânio aéreo

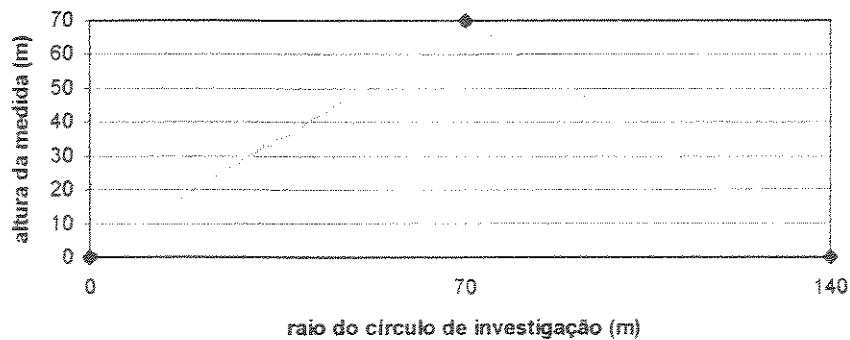


**Figura 4.6** Potássio terrestre x potássio aéreo



A relativa correlação entre os dados aéreos e terrestres pode-se dever há vários fatores, que associados, causam diferença entre as medidas: a cobertura vegetal, como era esperado, o círculo de investigação, como mencionado acima, as épocas no ano em que os dois levantamentos foram feitos, a diferença de tamanho do cristal dos detectores, tempos de integração diferentes, calibração dos espectrômetros, pequeno número de pontos no levantamento terrestre (do ponto de vista estatístico, causa maior dispersão).

**Figura 4.7** Círculo de investigação



### Comparação geofísica-geológica

Neste item, procurou-se fazer uma correlação entre os mapas de isolinhas dos dados aéreos, a geologia da área e os dados terrestres.

No anexo 1 são apresentados os mapas de isolinhas dos dados gamaespectrométricos e magnéticos do levantamento aéreo do Projeto Rio das Velhas.

Em termos gerais, pelo mapa de contagem total (cps) (Anexo 1, Fig. A1), pode-se distinguir os valores mais altos na porção noroeste, os médios na porção central e os menores na porção sudeste. Pode-se distinguir também valores menores na região central e noroeste. Este mapa evidencia a presença de, aparentemente, três litologias distintas na área de estudo. Comparando a Figura A1 com o mapa geológico (Anexo2) elaborado pela CPRM (1994), à partir dos dados geofísicos verifica-se que a concordância é grande, exceção feita a região noroeste, onde os “altos” teores não correspondem, aparentemente, ao resto da Unidade Córrego do Sítio. A litologia parece ser distinta daquela apresentada para unidade.

Os outros mapas de isovalores, K (cps), U (cps), Th (cps), K (%), U (ppm) e Th (ppm), (Anexo 1, Figuras A2, A3, A4, A5, A6 e A7), apresentam-se semelhantes, em maior ou menor grau, ao de contagem total.

Como pode ser observado nas Figuras do Anexo 2, com os dados expressos na unidade ppm (partes por milhão) tem-se uma maior riqueza de detalhes, maior contraste entre os níveis dos elementos. Como citado anteriormente, os dados em cps (contagens por segundo) são qualitativos e, podendo-se considerar aqueles em



unidades de teores ppm e porcentagem como “ semi-quantitativos” . A distinção entre eles pode ser observada nas razões ( Anexo 1, Figuras A8, A9 e A10), onde os dados podem ser utilizados de modo geoquímico.

No mapa geológico do Anexo 2, observa-se que os pontos das medidas terrestres 4, 5, 14, 17, 27 e 28 estão sobre uma formação ferrífera; os pontos 20, 21 e 22 situam-se numa região de canga e cobertura laterítica, todos pertencentes a Unidade Córrego do Sítio; 7, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 16, 18, 19, 23, 24, 25 e 26 estão na Unidade Santa Quitéria (metapelitos) e 1, 2, 3, 6, 13 e 29 na Unidade Córrego do Sítio (metaturbiditos).

Pela descrição geológica da área (seção 2.2), na Unidade Córrego do Sítio predominam metassedimentos pelíticos com alternância rítmica de bandas siltosas e argilosas e finos níveis carbonosos. Característica desta unidade é a presença de maior teor de potássio em relação aos dois outros elementos, urânio e tório, os quais apresentam-se com valores medianos. O ponto 29, situado na cava “Crista Laranjeira” tem o mais alto teor de K devido à presença de sericita.

Na Unidade Santa Quitéria predominam metassedimentos químicos e clásticos metamorfizados no fácies xisto verde. Esta unidade possui os valores radiométricos médios na parte central e os menores valores, situados também porção central e sudoeste. A presença de cobertura laterítica justifica o mínimo da região central. Pode ser que o mesmo justifique o da porção sudoeste.

Em alguns pontos de medida localizados nesta unidade, também são observados valores para K mais elevados. O elemento pode ser associado ao filito e a presença de sericita.

Os mais altos níveis de tório da Unidade Santa Quitéria são encontrados na região dos pontos 24, 25 e 26. O tório é alto, geralmente, em rochas clásticas grosseiras (arenitos, conglomerados) devido a sua presença nos minerais pesados (zircão, monazita, etc.)

Em relação ao urânio, este apresenta-se ora com valores mais altos, ora com valores mais baixos. O ambiente redutor favorece a concentração de urânio, como poderia ter ocorrido no material carbonoso presente na unidade.

Os mapas das razões U/K e Th/K (Anexo 1, Figuras A9 e A10) são semelhantes. Enquanto nos mapas de isolinhas individuais os teores de urânio e tório são normais, nos das razões verifica-se um enriquecimento do urânio e tório em relação ao potássio. Tal empobrecimento em potássio pode ser devido a um

metassomatismo sódico que tende a remover o potássio. Entretanto, apenas com uma análise mais detalhada é possível determinar com mais precisão a origem de tal fato.

O mapa da razão Th/U não mostra anomalias importantes, situando-se dentro da medida crustal (4-5).

O mapa de isolinhas do campo magnético mostra que este campo é alto em quase toda a área, exceção feita as anomalias na região nordeste, englobando parte da Unidade Santa Quitéria e nas porções noroeste, Unidade Córrego do Sítio e sudoeste, faixa da Unidade Mindá. Magneticamente, as duas primeiras são semelhantes e a última apresenta valores ainda mais baixos.

A anomalia maior ( Unidade Santa Quitéria) corresponde a cobertura laterítica. Numa formação ferrífera os níveis dos elementos Th, U e K geralmente são baixos, fato este comprovado pelas medidas terrestres.

Comparando com os dados radiométricos, verifica-se que, enquanto nas unidades Santa Quitéria e Mindá, os teores de K, U e Th, são baixos, na Unidade Córrego do Sítio os três são mais altos, corroborando o fato acima mencionado, de que a litologia nesta porção, não corresponde, geofisicamente, ao apresentado para a unidade.

#### **4.3 Integração dos dados de laboratório, campo e modelo matemático**

Para se verificar a influência da vegetação nas medidas aéreas, utilizou-se o modelo matemático (seção 2.1.5) e aplicou-se os parâmetros abaixo, alguns dos quais obtidos em laboratório, e feita uma estimativa teórica da atenuação da vegetação:

$$\mu = \mu_s + \mu_a - \mu_{el}$$

$$\rho_a = 1,29 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_e = 1,3 \text{ g.cm}^{-3}$$

$$h = 7000 \text{ cm}$$

onde  $\mu$  é o coeficiente de atenuação total,  $\mu_s$  é o coeficiente de atenuação do solo,  $\mu_a$  é o coeficiente de atenuação de massa do ar,  $\mu_{el}$  é o coeficiente de atenuação devido ao elemento (Th, U ou K),  $\rho_a$  é a densidade do ar,  $\rho_e$  é a densidade do solo e  $h$  é a

altura do detector. Através dos valores acima citados verificou-se, teoricamente, a atenuação da vegetação, mostrada nas Figuras 4.8, 4.9 e 4.10.

Como pode ser visto pelos gráficos, a intensidade detectada sem uma cobertura vegetal é relativamente mais alta e, a diferença de atenuação aumenta com a altitude.

Figura 4.8 Tório com vegetação x tório sem vegetação

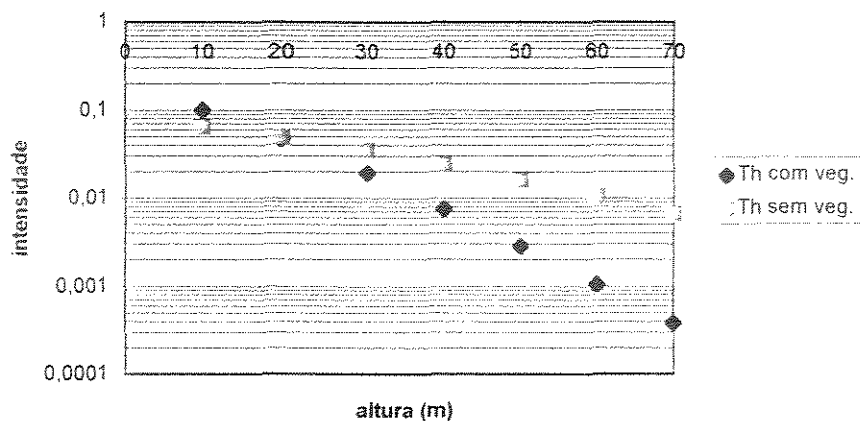


Figura 4.9 Urânio com vegetação x urânio sem vegetação

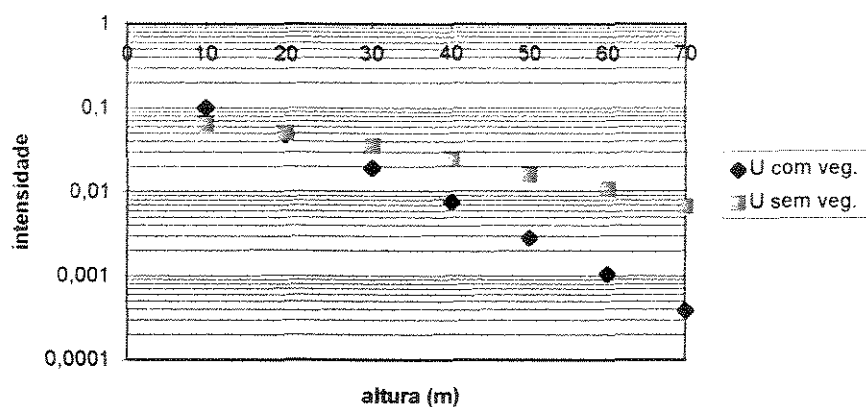
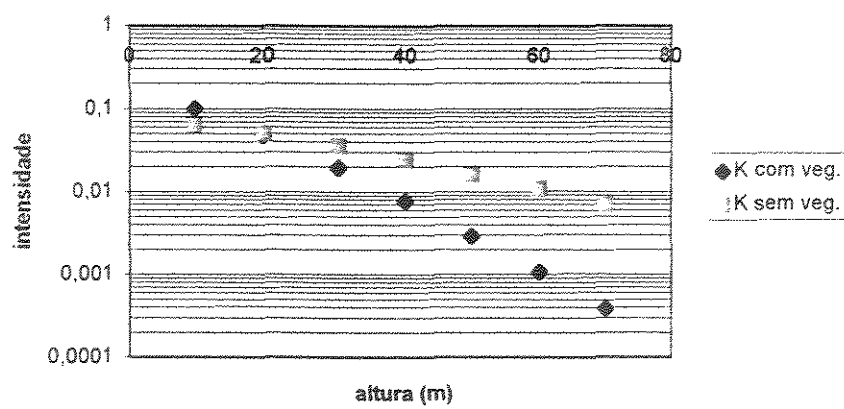


Figura 4.10 Potássio com vegetação x potássio sem vegetação



## 5. Conclusões

Em laboratório mediu-se o coeficiente de atenuação de massa de madeiras e folhas de árvores presentes na região do Quadrilátero Ferrífero, região esta em que predomina uma cobertura vegetal tipo Mata Atlântica. Observou-se nas medidas de laboratório que a densidade da madeira não tem forte influência no valor do coeficiente de atenuação de massa, mas sim a umidade, a qual aumenta a atenuação. Através destes resultados, observou-se que as madeiras apresentam maior atenuação que as folhas.

Pela comparação entre os dados aéreos e terrestres pode-se dizer que houve a atenuação pela vegetação em diferentes porcentagens. Uma melhor correlação entre os dados aéreos e terrestres poderia ser obtida se não houvesse a grande diferença de tamanho entre os cristais dos detectores, maior cuidado na calibração do detector aéreo, tempos de integração correspondentes, entre outros fatores. Há também o fato da medida aérea ser espacial (círculo de investigação) e a terrestre ser pontual.

Pelo modelo matemático também observou-se a atenuação, bem como a diminuição da intensidade com a altitude.

A transformação dos dados de cps para ppm, ou seja, de qualitativos para “semi-quantitativos”, foi de grande valor no trabalho, possibilitando que os mesmos fossem comparados aos dados terrestres. Essa transformação também permite a utilização dos dados aéreos em análises geoquímicas ou mesmo como variáveis em Sistemas de Informação Georreferenciadas.

Sugere-se que num próximo trabalho tome-se um maior cuidado na calibração do equipamento nos levantamentos aéreos, para que haja uma melhor comparação com os terrestres. Melhor seria que numa análise entre medidas como a realizada neste trabalho (terrestre e aéreo), houvesse um acompanhamento do pré-processamento dos aéreos pelo próprio autor, possibilitando um controle das variáveis.

A escolha de uma área com vegetação, porém menos acidentada, também é de fundamental importância, pois facilita o acesso e, principalmente, a coleta de um maior número de medidas. Notou-se que os 29 pontos registrados neste trabalho não foram suficientes para se chegar a uma conclusão definitiva.

Seria muito interessante que fossem coletadas amostras de solo e rocha correspondentes às medidas terrestres; a análise laboratorial dessas amostras, no que

concerne a composição e índices dos elementos radioativos, auxiliaria muito na análise comparativa com a geologia.

## 6. Referências bibliográficas

- BAILEY, R.C.** 1986. The altitude dependence of terrestrial gamma-ray spectra: a simple model. *Geophysics*, **51**(11): 2108-2116.
- CARROL, T. R.** 1981. Airborne soil moisture measurement using natural terrestrial gamma radiation. *Soil Science* **132**(5): 358-375.
- CLARK, R. B., DUVAL, J. S., ADAMS, J. A. S.** 1972. Computer Simulation of an Airborne Gamma-Ray Spectrometer. *Journal of Geophysical Research*, **77**(17): 3021-3031.
- CRIST, E.P., LAURIN, R. & CICONE, R.C.** 1986. Vegetation and soils information contained in transformed Thematic Mapper Data. *ESA Publications Division*, 1465 - 1470.
- DICKSON, B. H., BAILEY, R. C., GRASTY, R. L.** 1981. Utilizing multi-channel airborne gamma-ray spectra. *Canadian Journal of Earth Science*, **18**: 1793-1801.
- DORR, J. V. N., GAIR, J. E., POMERENE, J. B., RYNEARSON, G. A.** 1957. Revisão da Estratigrafia Pré-Cambriana do Quadrilátero Ferrífero. *Avuls. Div. Fom. Prod. Min. Dep. Nac. Prod. Min.*, Rio de Janeiro, **81**, 31p.
- DORR, J. V. N.** 1969. Physiographic, Stratigraphic and Structural Developments of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *U. S. Geol. Surv.*, Washington, **611-A**, 110p.
- DUVAL, J.S., COOK, B. & ADAMS, J.A.S.** 1971. Circle of investigation of an airborne gamma-ray spectrometer. *Journal of Geophysical Research*, **76**: 8466 - 8470.
- DUARTE, M. I. M., AMARAL, G.** 1997. Em elaboração.
- EVANS, R. D.** 1967. *Atomic Nucleus*. Macgraw Hill, New York.
- FERRAZ, E. S. B.** 1976. Determinação da densidade de madeira por atenuação de radiação gama de baixa energia. *IPEF Piracicaba*, **112**: 61-68.
- FERRAZ, E. S. B., MANSELL, R. S.** 1979. Determining water content and bulk density of soil by gamma ray attenuation methods. *Bulletin 807, University of Florida*, 51 p.

- FERREIRA, F. J. F.** 1991. *Aerogamaespectrometria e aeromagnetometria de um trato ocidental do Pré-Cambriano paulista*. São Paulo, 150p. (Tese de doutoramento IAG/USP)
- FIGUEIREDO, I. & TRAVASSOS, J.M.** 1992. Avaliação da blindagem de uma floresta à radiação gama natural emitida pelo solo. *Revista Brasileira de Geofísica*, 10(1): 55 - 64.
- FITCH, A. A.** 1982. *Developments in Geophysical Exploration Methods-3*. Applied Science Publishers LTD, England, 150 p.
- GRASTY, R. L.** 1975. Atmospheric absorption of 2,62 MeV gamma-ray photons emitted from the ground. *Geophysics* 40: 1058-1065.
- GRASTY, R. L.** 1979. Gamma ray spectrometric methods in uranium exploration-theory and operational procedures. *Geol. Surv. Can., Econ. Geol. Rep.* 31: 147-161. Paper 10 B.
- GRASTY, R. L., KOSANKE, K. L., FOOTE, R. S.** 1979. Fields of view of airborne gamma-ray detectors. *Geophysics* 44: 1447-1457.
- HILDEBRAND, J.D.** 1993. O Emprego de um Multisistema Aerogeofísico para Prospecção de ouro na Região do Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais. In: **CONGR. INT. DA SOC. BRAS. DE GEOF., 3.** Rio de Janeiro, 1993. *Anais...* Rio de Janeiro, SBGF.- v.1, p. 439 a 444.
- IAEA - TECDOC 566**, 1990. The use of gamma-ray data to define the natural radiation environment
- KOGAN, R.M., NAZAROV, I.M. & FRIDMAN, SH.D.** 1971. *Gamma Spectrometry of Natural Environments and Formations*. IPST Jerusalem, 337p.
- LAVREAU, I. & ALONSO, M.F.** 1991. Correcting airborne radiometric data for water/vegetation screening using Landsat Thematic Mapper Imagery. In: **THEMATIC CONFERENCE ON GEOLOGY REMOTE SENSING**, 8. Denver, Colorado, USA.
- LOVBORG, L., JENSEN, L. B., KIRKEGAARD, P., CHRISTIANSEN, E.M.** 1979. Monitoring of natural soil radioactivity with portable gamma-ray spectrometer. *Nuclear Instruments and Methods* 167:341-348.



- LOVBORG, L., KIRKEGAARD, P. 1974.** Response of 3" x 3" NaI(Tl) detectors to terrestrial gamma radiation. *Nuclear Instruments and Methods* **121**: 239-251.
- MARES, S. 1984.** *Introduction to applied geophysics*. D. Reidel Publishing Company Dordrecht/Boston/Lancaster, 581p.
- NIELSON, D. L., LINPEI, C., WARDS, S. H. 1990.** Gamma ray Spectrometry and Emanometry in Environmental Geophysics. *Geotechnical and Environmental Geophysics (Investigations in Geophysics n. 5)*. Soc. Of Exploration Geophysics, vol. 1.
- PASCHOLATI, E. M., AMARAL, G. 1997.** Em elaboração.
- PEREIRA, E.B. & NORDEMANN, D.J.R. 1983.** The effects of a tropical rain forest cover on airborne gamma-ray spectrometry. *Revista Brasileira de Geofísica*, 1: 99-108.
- PINTO, F. A. 1978.** *Determinação de densidade de madeira por atenuação de radiação  $\gamma$  do  $^{241}\text{Am}$* . Piracicaba - SP. (Tese de mestrado ESALQ/USP).
- PITKIN, J. A., DUVAL, J. S. 1980.** Design parameters for aerial gamma-ray surveys. *Geophysics*, **45**: 1427-1439.
- SCHRANK, A., SILVA, M. G. 1993.** Greensone Belts do Craton do São Francisco, Brasil. *O Craton do São Francisco*: 85-118.
- SCHWARZER, T. F., COOK, B. G., ADAMS, J. A. 1972.** Low altitude Gamma-Spectrometric Surveys from Helicopters in Puerto Rico as an Example of the Remote Sensing of Thorium, Uranium, and Potassium in soils and Rocks. *Remote Sensing of Environment*, **2**: 83-94.
- SILVA, S. L. 1991.** *Sinopse da Folha Santa Bárbara*. CPRM, inédito, 6p.
- TAKAI, V., PINTO, L.C., DUCHIM, J. Jr. 1991.** Córrego do Sítio gold deposit. *Brazil gold'91*: 811-816.
- TECHNICAL REPORTS SERIES No. 174. 1976.** Radiometric Reporting Methods and Calibration in Uranium Exploration. *IAEA*, Vienna.
- TELFORD, W. M. 1990.** *Applied Geophysics*. Cambridge University, Cambridge, 770p
- TRAVASSOS, J.M. & PIRES, A.C.B. 1994.** The screening effect of a Tropical Forest on airborne gamma-ray spectrometry. *Nucl.geophys.* **8(5)**: 461-471.

## ERRATA

Página 4 - alterar no 6º parágrafo: “aproximação ótica e Monte Carlo” por “aproximação experimental (ótica) e estatística (Monte Carlo)”

Página 8 - onde se lê “Coeficientes de atenuação Compton”, leia-se “Coeficientes de atenuação Compton para radiação monoenergética”

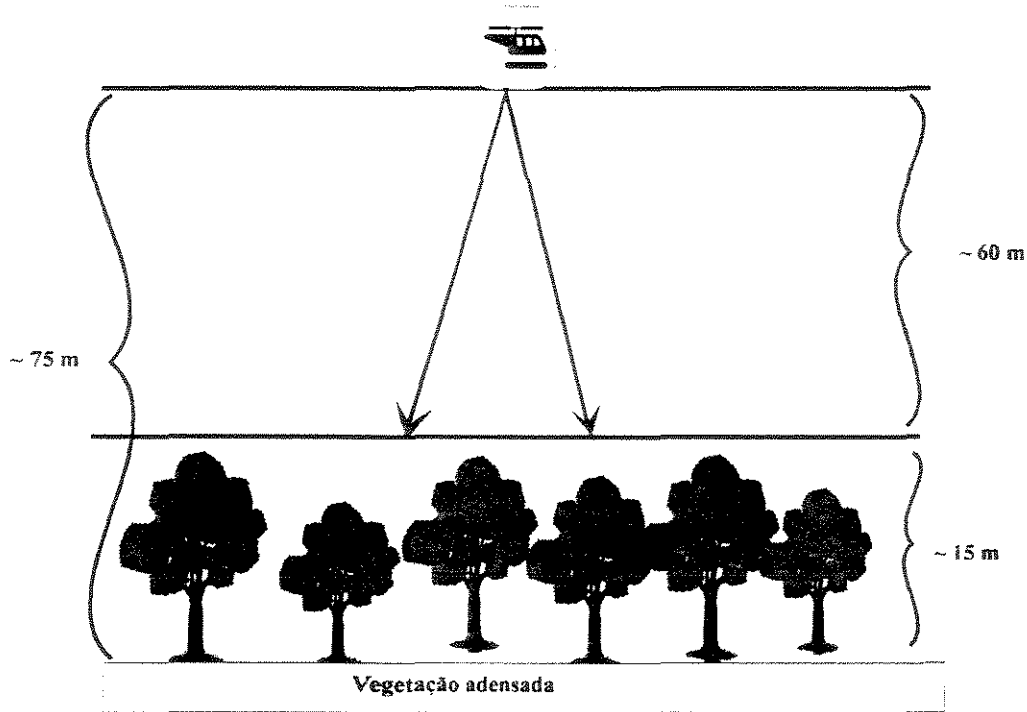
Página 19 - no 2º parágrafo acrescentar após a frase que se inicia por “Uma quarta fonte...” o seguinte: “Utiliza-se para isto um corpo de água”.

Página 37 - acrescentar no 1º parágrafo, após as palavras “os coeficientes de atenuação”:  
“, para as energias 1,46 MeV do  $^{40}\text{K}$ , 1,76 MeV do  $^{238}\text{U}$  e 2,62 do  $^{232}\text{Th}$ ”.

Página 43 - desconsiderar o seguinte: no 2º parágrafo a partir de “Previamente fez-se a correção...” até o final do 4º parágrafo.

Página 46 - acrescentar no final do 2º parágrafo, após a frase que se inicia por “Pela Figura 4.2 vê-se...” o seguinte: “(fonte de  $^{241}\text{Am}$  com energia de 0,0595 MeV)”.

Página 59 - acrescentar ao capítulo 5 após o último parágrafo:



**Figura 4.11** Esquema de medida aerogamaespectrométrica

A Figura 4.11 sugere a equivalência da vegetação existente a uma camada adensada, com aproximadamente  $3 \text{ g/cm}^2$ . Esta vegetação pode atenuar a radiação gama natural emitida pela superfície terrestre em diferentes porcentagens. Os equipamentos que medem a altura de vôo nos aerolevantamentos o fazem somente até a copa das árvores. A altura da vegetação não é portanto considerada, sendo então necessário que esta seja adicionada à de vôo. Isso aparentemente não foi feito no processamento dos dados do Projeto Rio das Velhas, o que pode ter comprometido os resultados.

A situação de atenuação pela vegetação foi simulada por um modelo matemático (seção 2.1.5) de 2 camadas (solo + floresta). Dados de campo e de laboratório foram aplicados à esta situação e os resultados mostraram, teoricamente, a atenuação da radiação gama natural pela floresta.

Página 60 - a nona referência passa a ser:

**DUARTE, M. I. M., MIRANDA, R. M., AMARAL, G., PASCHOLATI, E. M. 1997.**

Correcting vegetation shield effect on aerial gamma-spectrometry based on LANDSAT-TM image processing. In: **TWELFH INTERNATIONAL CONFERENCE AND WORKSHOPS ON APPLIED GEOLOGIC REMOTE SENSING**, Denver, CO, 1997.

Página 62 - a quarta referência passa a ser:

**PASCHOLATI, E. M., AMARAL, G. 1997.** Correção dos dados magnéticos e gamaespectrométricos do Projeto Rio das Velhas. Em elaboração.

## **Anexo 1**

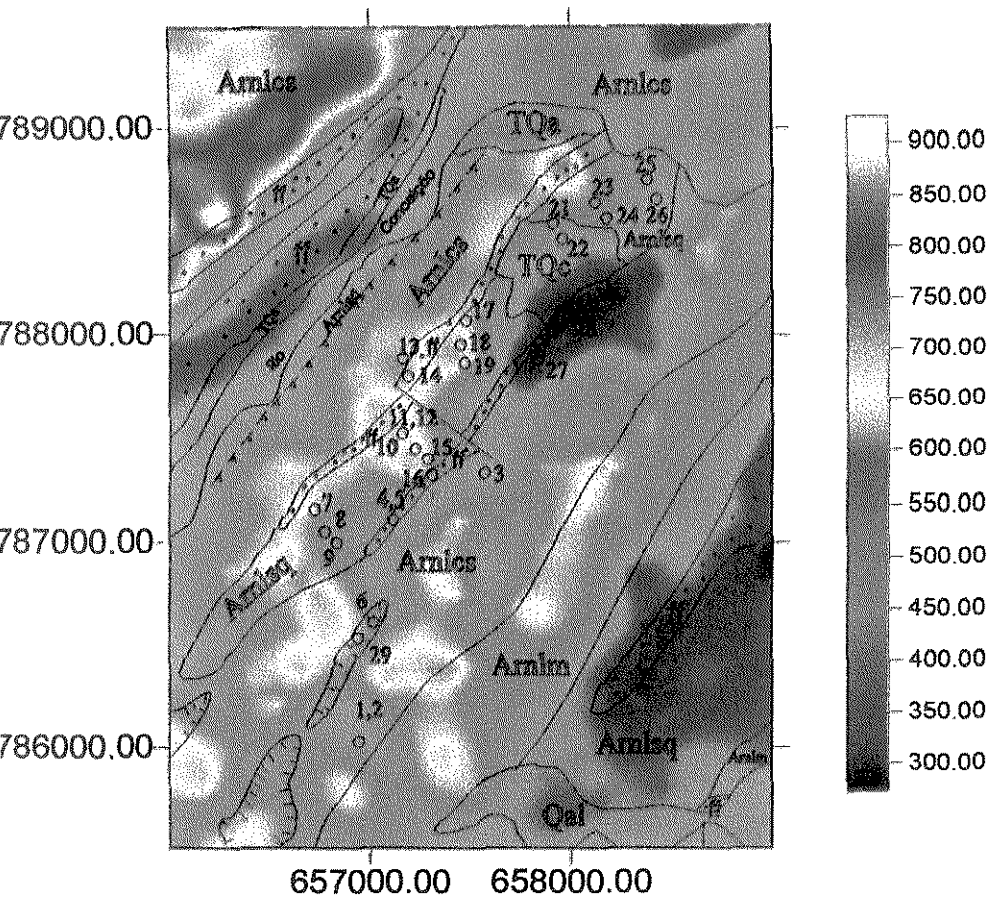


Figura A1 - Mapa de isolvalores da contagem total (cps)  
(símbolos, vide anexo 2)

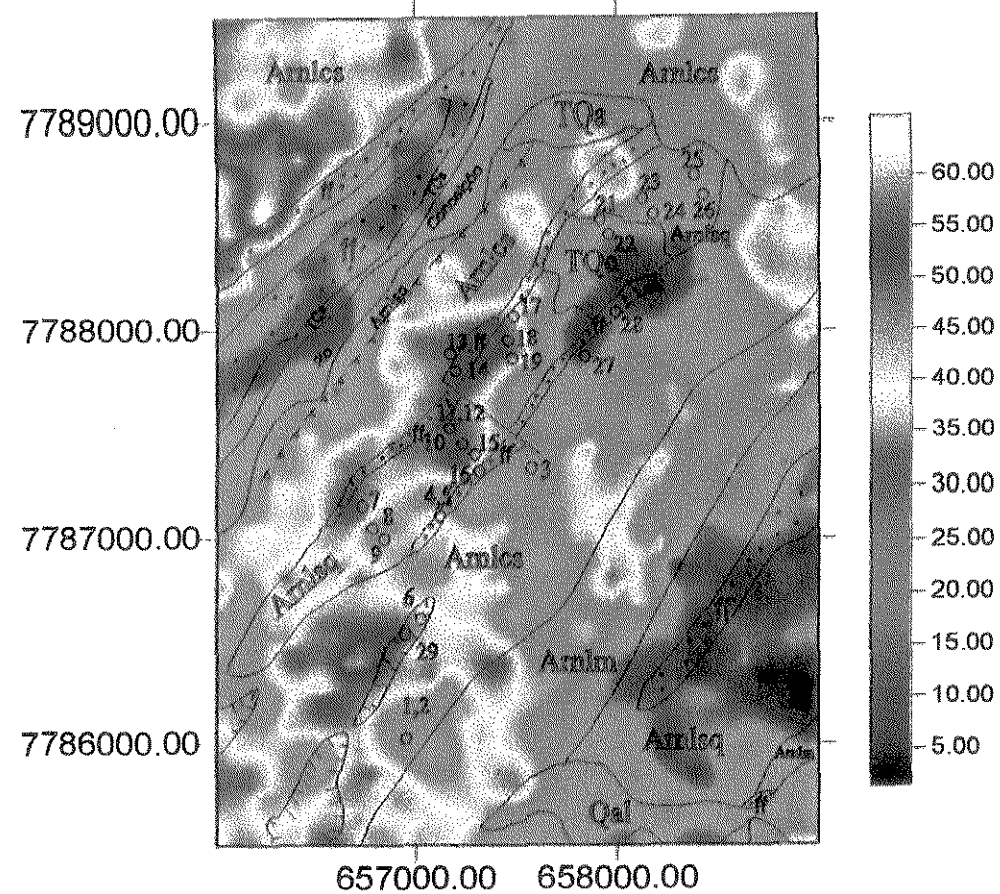


Figura A2 - Mapa de isovalores da potássio (cps)  
(símbolos, vide anexo 2)

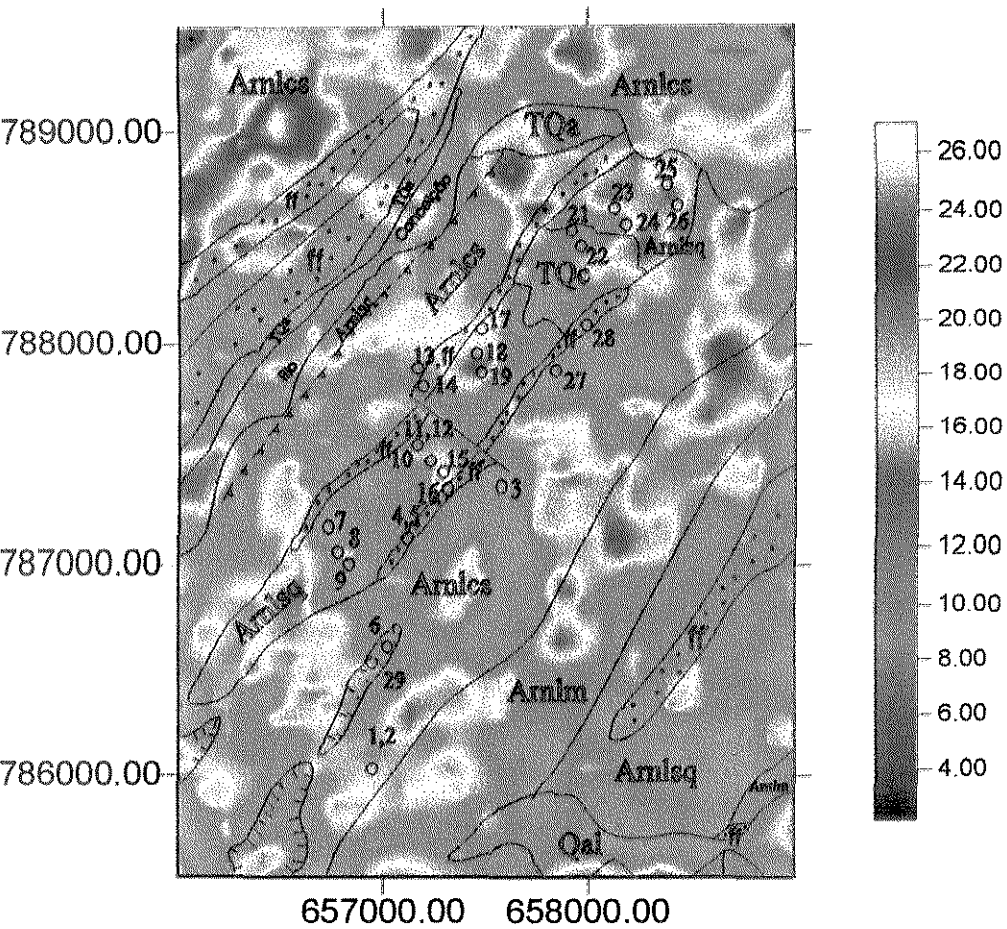


Figura A3 - Mapa de isovalores do urânio (cps)  
(símbolos, vide anexo 2)

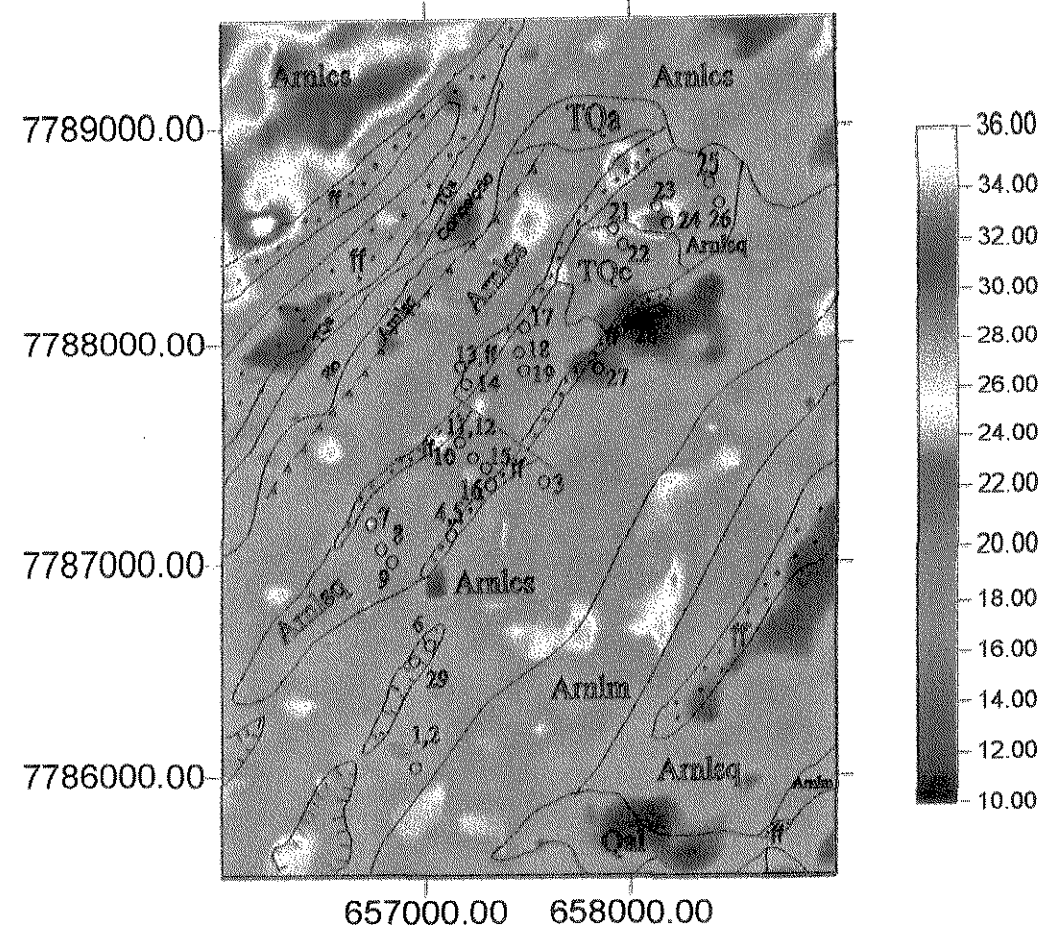


Figura A4 - Mapa de isovalores do tório (cps)  
(símbolos, vide anexo 2)

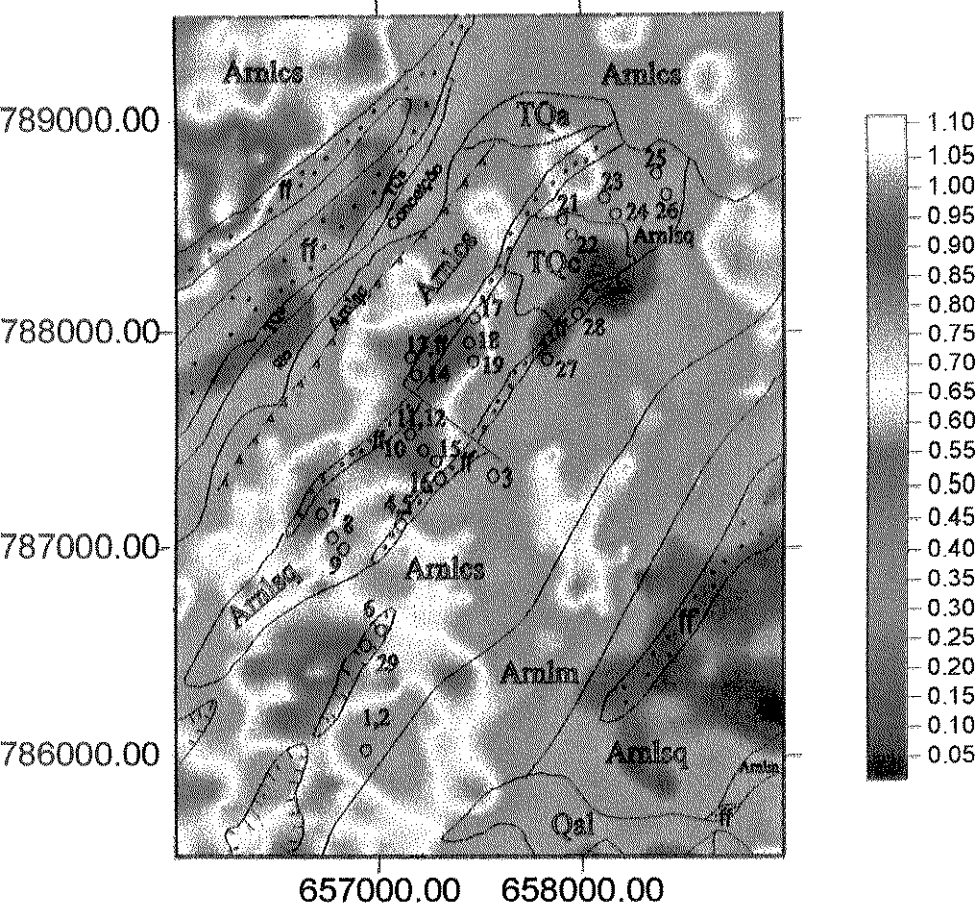


Figura A5 - Mapa de isovalores do potássio (%)  
(símbolos, vide anexo 2)

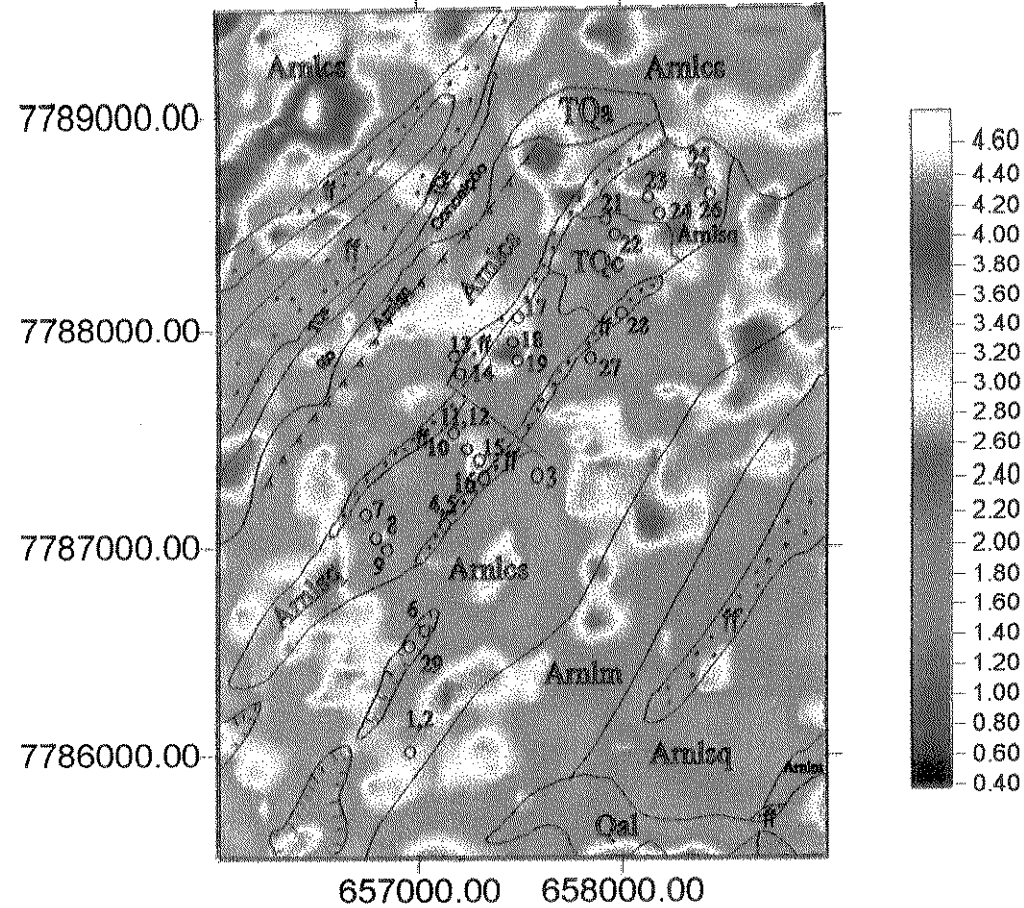


Figura A6 - Mapa de isovalores do urânio (ppm)  
(símbolos, vide anexo 2)



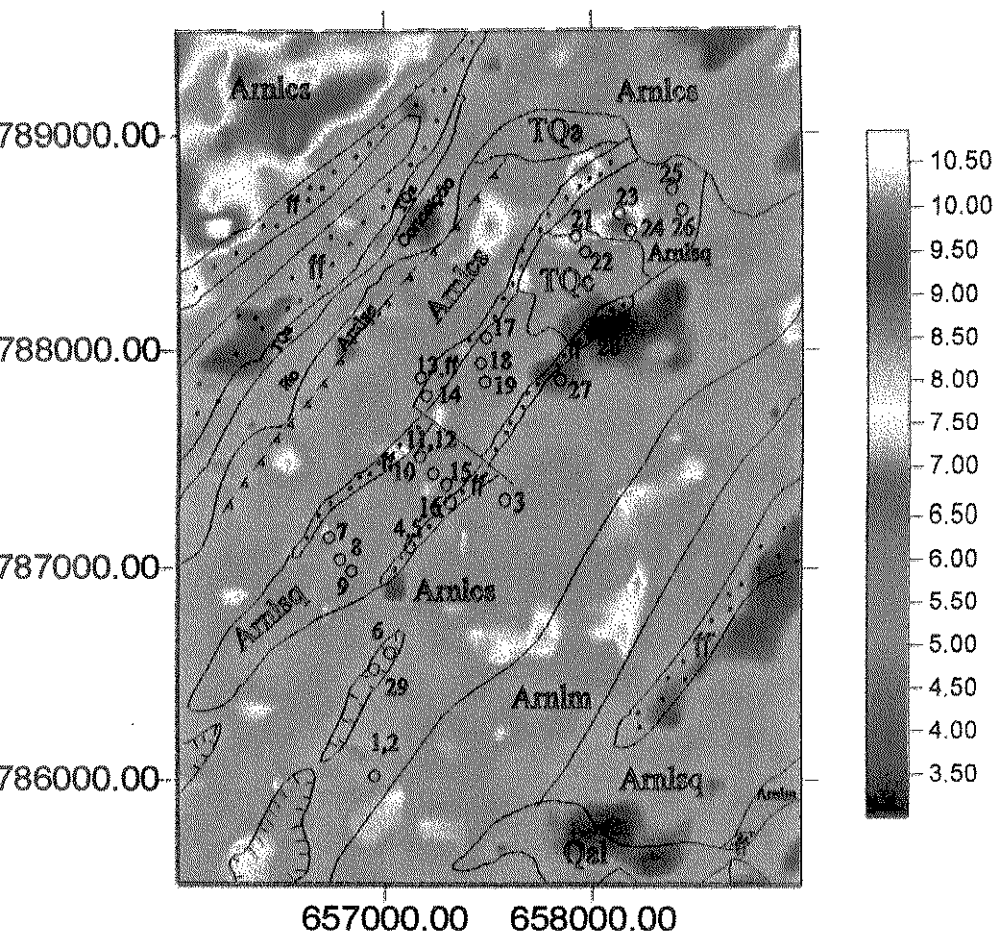


Figura A7 - Mapa de isovalores do tório (ppm)  
(símbolos, vide anexo 2)

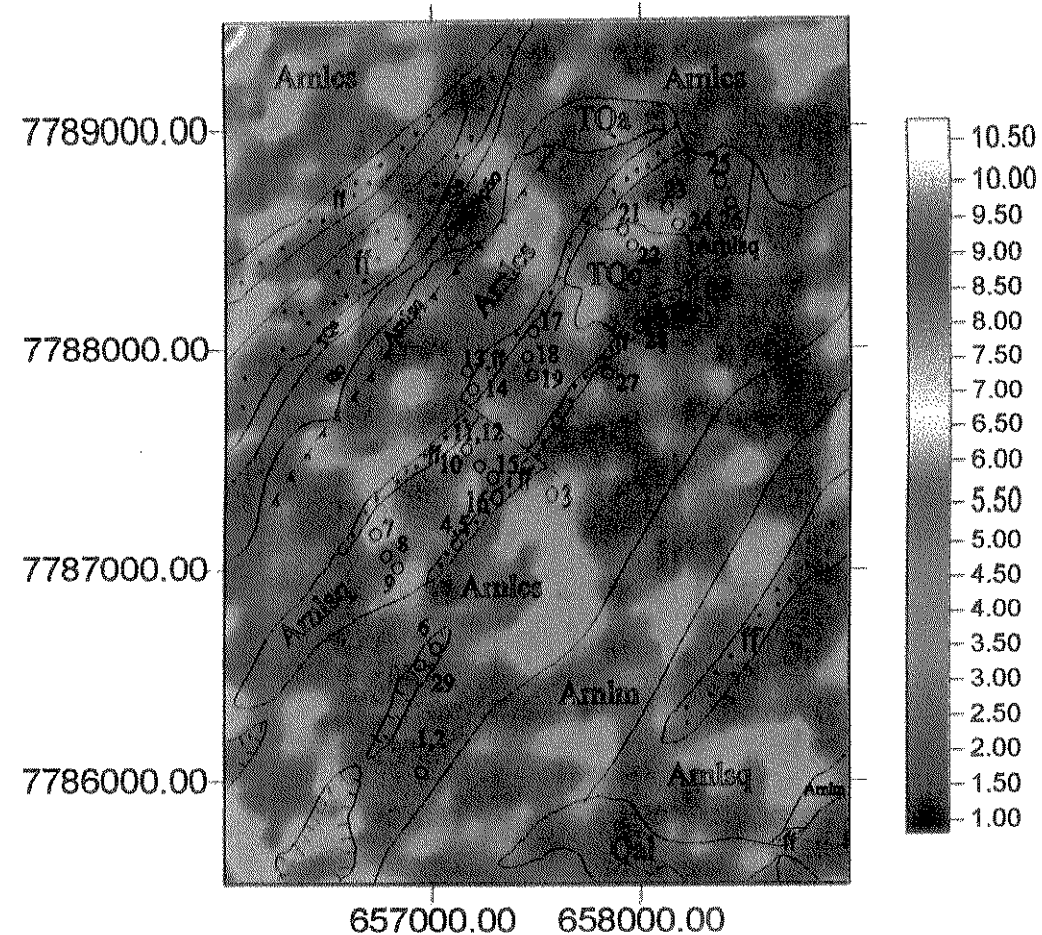


Figura A8 - Mapa de isovalores da razão Th/U  
(símbolos, vide anexo 2)



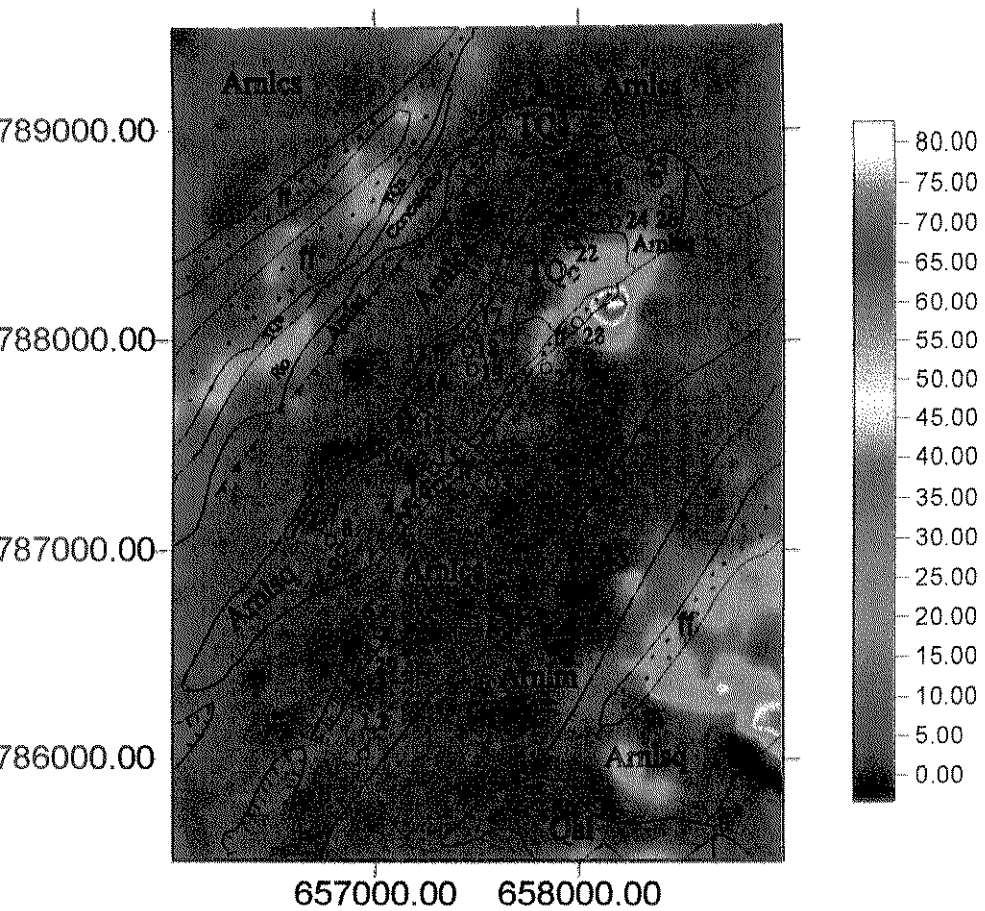


Figura A9 - Mapa de isovalores da razão U/K  
(símbolos, vide anexo 2)

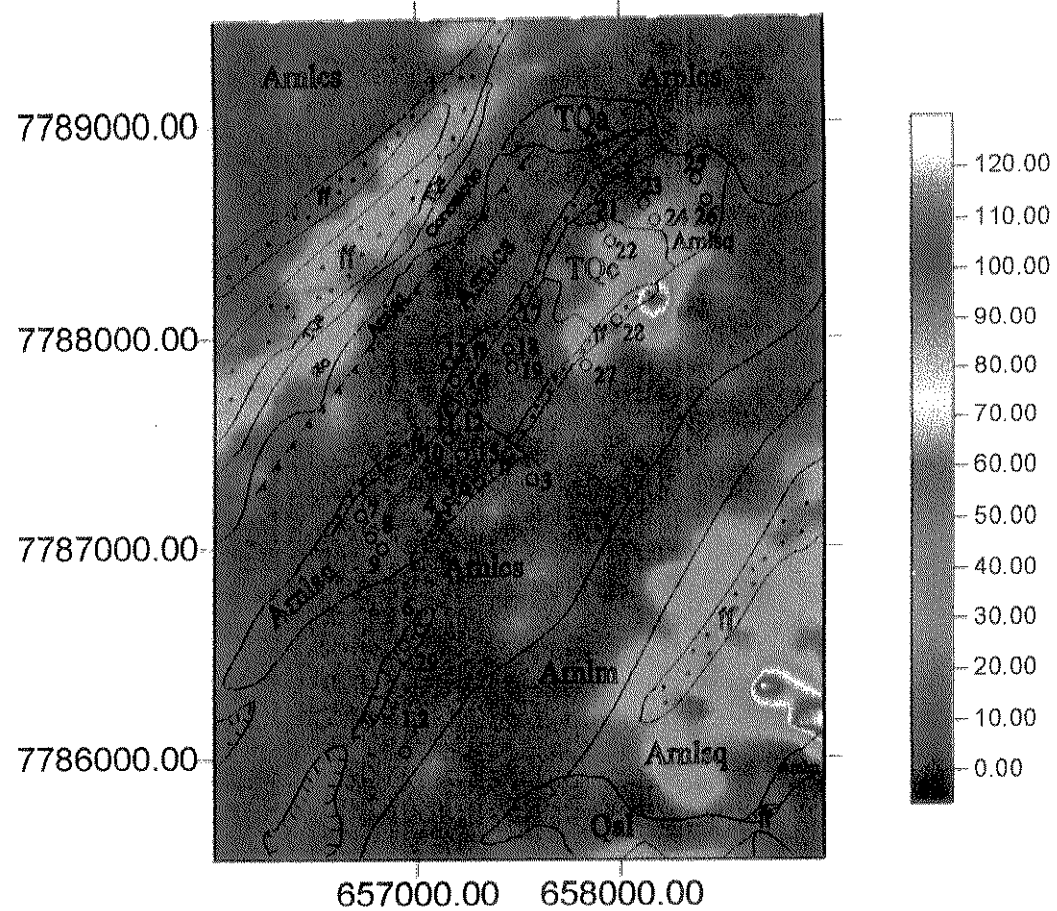


Figura A10 - Mapa de isovalores da razão Th/K  
(símbolos, vide anexo 2)

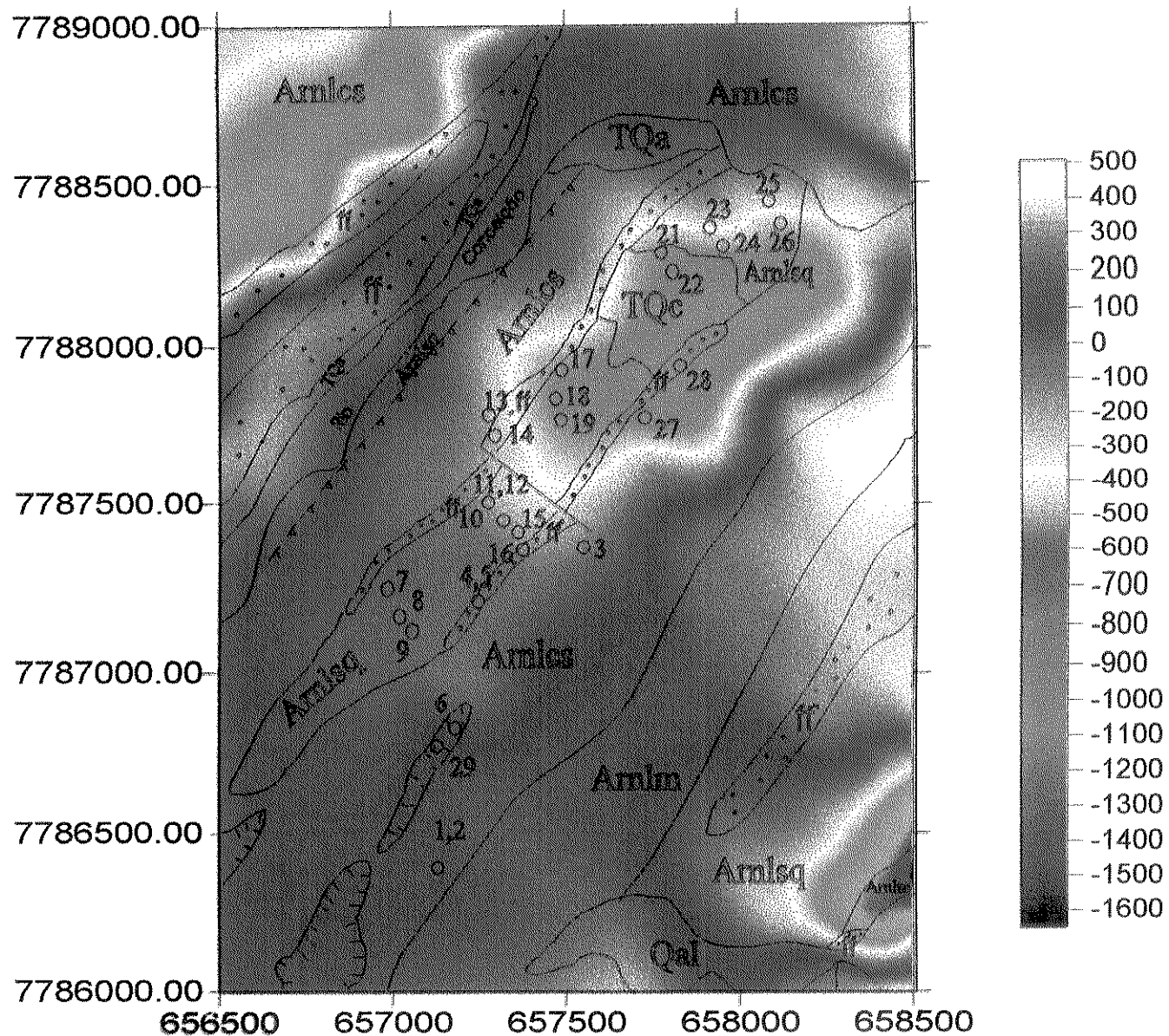


Figura A11 - Mapa do campo magnético (nT)

(símbolos, vide anexo 2)

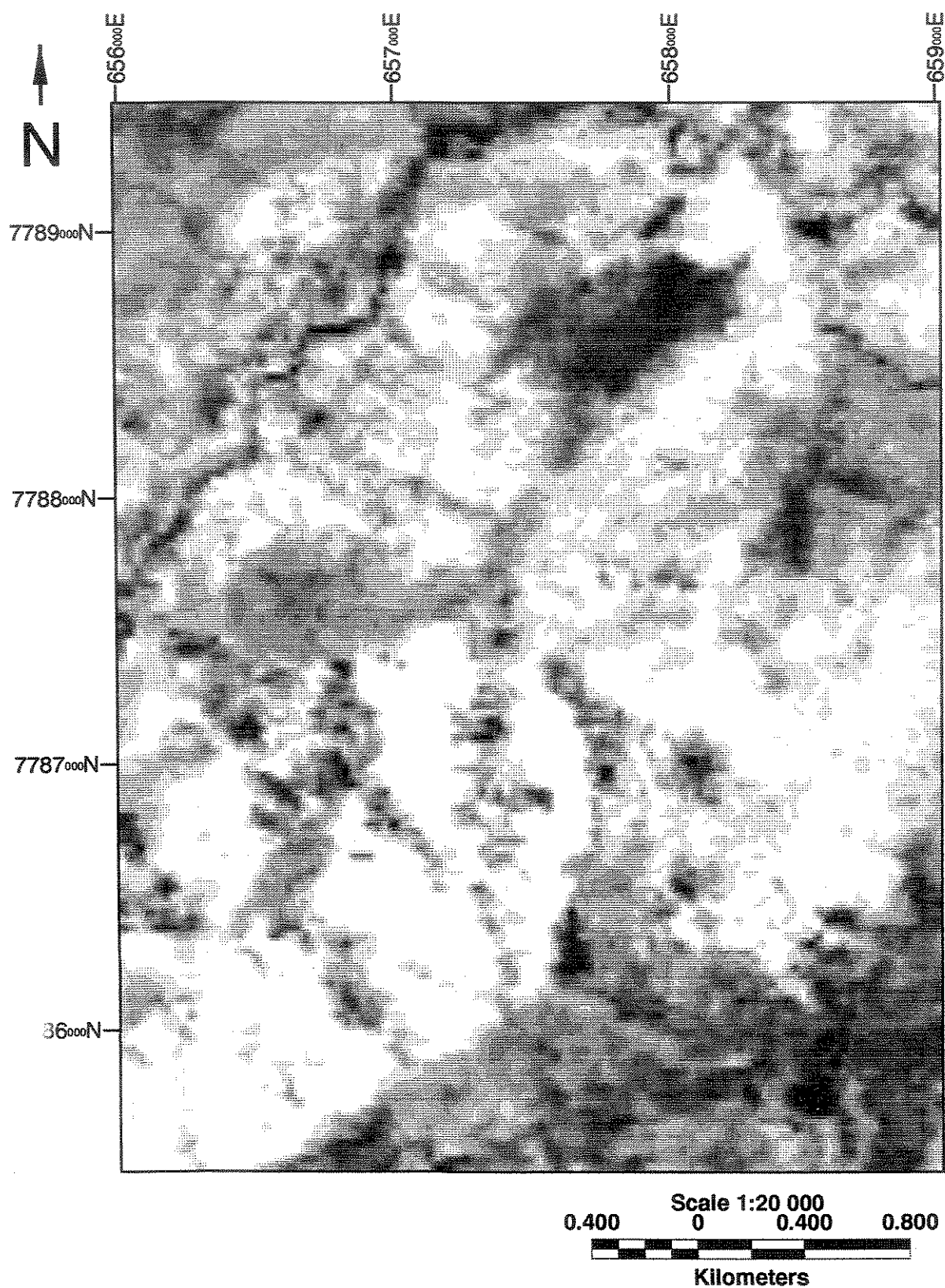


Figura A12 - Imagem do índice de vegetação de diferença normalizada (NDVI).